

Trabajo de Fin de Grado

Ingeniería en Tecnologías Industriales

Modelado, dimensionamiento y aplicación de una batería de flujo redox de vanadio

MEMORIA

Autor: Miguel Moreno Yerro
Director: Ramon Costa Castelló
Convocatoria: Enero 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



RESUMEN

En este trabajo se apuesta por hacer un pequeño recorrido inicial sobre los diferentes sistemas de almacenamiento que existen actualmente, para acabar desarrollando y analizando exhaustivamente uno de los más prometedores de cara al futuro, las baterías de flujo de vanadio.

Inicialmente se trata tanto sistemas de almacenamiento mecánico como electroquímico, todo pasando por los sistemas de almacenamiento eléctrico. De todos ellos se muestran uno o varios ejemplos de aplicación.

A partir de ahí, se centra especialmente la atención en el sistema de almacenamiento basado en la batería de flujo redox de vanadio, VRFB. Sistema del cual se exponen las ecuaciones diferenciales que rigen su comportamiento y se analizan. Pasando por argumentar las grandes ventajas y las escasas desventajas de este sistema y se muestra punto a punto las características que definen este tipo de baterías.

Finalmente, después de ver las propiedades prometedoras de esta tecnología, se aplican en un caso práctico. Un refugio de montaña en el cual se estudia la viabilidad de instalar una VRFB junto a paneles solares y aerotermia para convertirlo en un emplazamiento totalmente auto-sostenible mediante energías renovables.

Para concluir, se expone un cálculo económico donde se discute la viabilidad económica de dicha aplicación real de las VRFBs.

SUMARIO

1. PREFACIO	12
1.1. Motivación	12
1.2. Objetivo	12
2. INTRODUCCIÓN	13
2.1. Almacenamiento de energía	13
2.2. Beneficios del almacenamiento de energía	14
2.3. Tipos de Almacenamiento de Energía	17
2.3.1. Sistemas de Almacenamiento Mecánico	17
2.3.1.1. Hidroelectricidad de almacenamiento por bombeo (Pumped-Storage Hydroelectricity)	17
2.3.1.2. Volantes de inercia (FES)	18
2.3.2. Sistemas de Almacenamiento Eléctrico	19
2.3.2.1. Supercondensadores	19
2.3.3. Sistemas de Almacenamiento Electroquímico	20
2.3.3.1. Batería de Plomo-Ácido	20
2.3.3.2. Batería de Ion de Litio	21
2.3.3.3. Batería de Flujo	21
3. BATERÍAS DE FLUJO REDOX DE VANADIO (VRFB)	26
3.1. Modelo y ecuaciones	29
3.1.1. Estado de Carga	31
3.1.2. Voltaje de la celda	32
3.1.3. Construcción de la pila de celdas	32
3.1.4. Corriente de derivación (pérdidas)	34
3.1.5. Flujo mínimo, Q_{min}	35
3.1.6. Ecuaciones de equilibrio y gráficas	37
3.1.6.1. Concentraciones en celda	38
3.1.6.2. Potencia de la pila de celdas	42
3.1.6.3. Flujo mínimo, Q_{min}	44
4. DIMENSIONAMIENTO DE UNA BATERÍA DE FLUJO REDOX DE VANADIO	46
4.1. Emplazamiento	46

4.2. Consumos.....	47
4.2.1. Consumo eléctrico aerotermia.....	50
4.3. Generación	54
4.4. Cálculos y ecuaciones de la batería.....	59
4.4.1. Medidas adicionales	63
5. VIABILIDAD ECONÓMICA.....	65
6. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	68
CONCLUSIONES	69
AGRADECIMIENTOS	71
BIBLIOGRAFÍA.....	72

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Esquema generación centralizada versus generación distribuida del futuro. [55]	13
Ilustración 2. Nivelación de carga con el uso de ESS. [4]	15
Ilustración 3. El agua se bombea cuesta arriba durante la noche. [56]	17
Ilustración 4. El agua fluye cuesta abajo durante las horas del día. [56]	18
Ilustración 5. Componentes de un volante de inercia para el almacenamiento de energía. [57]	19
Ilustración 6. Principio de funcionamiento supercondensadores [8]	19
Ilustración 7. Proceso carga-descarga de una batería de Litio. [12]	21
Ilustración 8. Representación esquemática de una BF mono-celda. La celda y los tanques están separados. [16]	22
Ilustración 9. Baterías de flujo, modularidad de energía y potencia. [18]	24
Ilustración 10. Reacciones químicas en la celda de una VRFB. [25]	27
Ilustración 11. Proceso de carga y descarga VRFB. [24] (a) carga; (b) descarga	27
Ilustración 12. Variación de la concentración de los iones de vanadio en el proceso de carga y descarga. [26]	28
Ilustración 13. Esquemas del flujo de electrolitos. Izquierda: flujo en serie. Derecha: flujo en paralelo [26]	32
Ilustración 14. Estructura geométrica del modelado de una VRFB con una pila de 5 celdas. [32]	33
Ilustración 15. Esquema del suministro de electrolito y su equivalente eléctrico para pila de dos celdas. [33]	34
Ilustración 16. Puntos de equilibrio de V^{2+} para 15% SOC	38
Ilustración 17. Puntos de equilibrio de V^{3+} para 15% SOC.	38

Ilustración 18. Puntos de equilibrio de VO^{2+} para 15% SOC.	39
Ilustración 19. Puntos de equilibrio de VO_2^+ para 15% SOC.	39
Ilustración 20. Puntos de equilibrio de V^{2+} para 85% SOC.	40
Ilustración 21. Puntos de equilibrio de V^{3+} para 85% SOC.	41
Ilustración 22. Puntos de equilibrio de VO^{2+} para 85% SOC.	41
Ilustración 23. Puntos de equilibrio de VO_2^+ para 85% SOC.	42
Ilustración 24. Pstack en función de la corriente y del SOC. Proceso de Carga.	43
Ilustración 25. Pstack en función de la corriente y del SOC. Proceso de Descarga.....	43
Ilustración 26. Qmin en función de la corriente y del SOC. Proceso de Carga.	44
Ilustración 27. Qmin en función de la corriente y del SOC. Proceso de Descarga.....	45
Ilustración 28. Refugio de Lizara [36].....	46
Ilustración 29. Consumo eléctrico de Lizara durante los meses de Abril, Julio y Diciembre. [37].....	47
Ilustración 30. Consumo térmico de Lizara durante los meses de Abril, Julio y Diciembre. [37].....	47
Ilustración 31. Equivalencia consumos. Consumos eléctrico y térmico por meses.	48
Ilustración 32. Esquema climatización y producción de ACS con Yutaki S en el refugio. [39]	49
Ilustración 33. Temperaturas de Aragüés del Puerto por meses. [41].....	51
Ilustración 34. Catálogo técnico Yutaki S, de HITACHI. [42]	52
Ilustración 35. Superficie disponible en el tejado del refugio. [43]	54
Ilustración 36. Ángulo de inclinación y azimut panel solar. [45]	55
Ilustración 37. Recorrido del sol en las estaciones de verano e invierno. [46].....	56
Ilustración 38. Valores de Radiación Solar para diferentes ángulos de inclinación. Azimut constante 180° (Sur) [47]	57

Ilustración 39. Cálculo de las pérdidas del sistema. [51]	58
Ilustración 40. Instalación fotovoltaica aislada. [52]	59
Ilustración 41. Contenedor de transporte de mercancías. Dimensiones 2,34·2,29·5,9 m ³ [53]	61

Índice de Tablas

Tabla 1. Variables, constantes y sus valores	30
Tabla 2. Constantes para la resolución de los puntos de equilibrio. [29]	37
Tabla 3. Desglose Consumo Eléctrico total.	50
Tabla 4. Temperaturas exteriores y de impulsión del agua por meses.	51
Tabla 5. Consumo Eléctrico aerotermia.....	53
Tabla 6. Consumo Eléctrico total.	53
Tabla 7. Valores de Radiación Solar para diferentes ángulos de inclinación. Azimut constante 180° (Sur) [47]	56
Tabla 8. Energía total generada.	58
Tabla 9. Parámetros dimensionamiento y sus valores.	61
Tabla 10. Características dimensionamiento batería.....	61
Tabla 11. Energía eléctrica generada - energía eléctrica consumida.....	62
Tabla 12. Energía eléctrica generada - energía eléctrica consumida. Vers2	63
Tabla 13. Inversión Inicial	65
Tabla 14. Ahorro anual	66

Nota: Cuando no hay una fuente especificada, significa que es una fuente propia.

1. PREFACIO

1.1. Motivación

Las energías renovables, como la energía solar y eólica, se están introduciendo cada vez más a escala global como fuentes alternativas de energía en busca de una economía verde y sociedad baja en carbono. Para los sistemas de energía distribuida de próxima generación, que se sustentan en una gran cantidad de fuentes de generación renovable, las tecnologías de almacenamiento de energía son indispensables. Entre las tecnologías de almacenamiento de energía disponibles, la batería de flujo redox se considera la más viable. Es por ello que este trabajo opta por desarrollar de una manera técnica las baterías de flujo redox de vanadio.

1.2. Objetivo

El objetivo de este proyecto pasa por, primero de todo, obtener un cierto conocimiento general sobre los distintos sistemas de almacenamiento disponibles a día de hoy en el mercado y con esto transmitir sus principales aplicaciones.

A continuación, el gran cometido de este trabajo, se basa en profundizar y comprender en su totalidad las grandes ventajas que ofrecen las baterías de flujo, y en concreto, analizar y modelizar las baterías de flujo redox de vanadio, VRFB.

Finalmente, una vez ahondado en el análisis, incluso gráfico, de las principales características y parámetros de estos tipos de batería, se buscará ofrecer una visión directa de sus aplicaciones a través de una propuesta de uso. Todo esto, por supuesto, acompañado de una evaluación económica.

2. INTRODUCCIÓN

Es evidente que a día de hoy cualquier actividad que se lleve a cabo requiere un uso de energía. No obstante, poder disfrutar de su uso requiere una previa generación y distribución de la energía.

Actualmente existen grandes plantas centralizadas de generación de energía que en un futuro serán complementadas con puntos de generación eléctrica distribuida, donde se intentará disminuir la distancia entre puntos de generación y consumo. El objetivo será integrar al máximo la generación limpia de energía eléctrica desde fuentes renovables (eólica, solar, mareomotriz...), que al tratarse de fuentes intermitentes e imprevisibles se necesita un sistema de almacenamiento de energía.

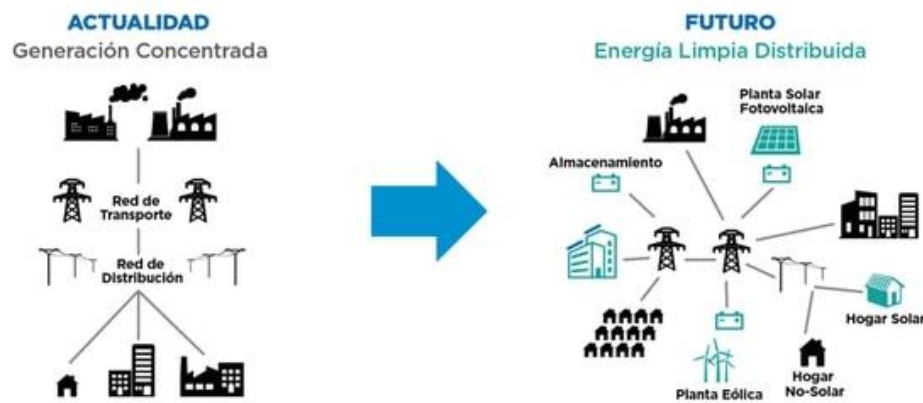


Ilustración 1. Esquema generación centralizada versus generación distribuida del futuro. [55]

Esto conllevará cambios en la tecnología requiriendo una correcta y optima gestión de la transmisión y distribución de la electricidad, por ello, el sistema de almacenamiento de electricidad será una herramienta clave.

2.1. Almacenamiento de energía

En el pasado, el almacenamiento de electricidad no era una prioridad para el desarrollo del sistema energético, en parte porque los beneficios eran muy limitados y además las tecnologías aún no eran económicas para llevar a cabo almacenamientos a gran escala. En

la actualidad, los recursos energéticos más utilizados en todo el mundo siguen siendo los combustibles fósiles. A través del funcionamiento del modelo tradicional de las grandes centrales generadoras, capaces de suministrar energía a los usuarios finales utilizando las redes de distribución y proporcionando energía de manera fiable y segura.

Frente a ello, derivan riesgos y problemas como puede ser el agotamiento de los recursos, la contaminación ambiental, los problemas políticos por la explotación de dichos combustibles fósiles... Y todo lleva a la necesidad de obtener energía de manera más limpia a través de las energías renovables (eólica, solar, mareomotriz...), que al tratarse de fuentes de energía intermitentes e imprevisibles [1] y para integrarlas en la red eléctrica, surge la necesidad de emplear Sistemas de Almacenamiento de Energía. [2]

Los sistemas de almacenamiento de energía (ESS, Energy Storage Systems) transforman la energía eléctrica de la red en otra forma de energía para ser almacenada y posteriormente consumida cuando se necesite. Debido a que la energía eléctrica debe ser consumida en el momento en que se genera, surge la necesidad de implantar sistemas de almacenamiento de ésta que sean eficientes. De igual modo, los ESS también son necesarios para compensar las variaciones de energía demandada y actuar como fuentes de alimentación ininterrumpida en sistemas de generación distribuida.

En definitiva, el almacenamiento de energía ha sido y todavía es un desafío en la implementación de sistemas energéticos debido a los diferentes factores que afectan a su generación, distribución y comercialización. El objetivo actual se centra en aumentar las capacidades de almacenamiento existentes, mejorar sus rendimientos, reducir costes y con ello aumentar la eficiencia del sistema eléctrico en general.

En el mercado actual existen diferentes tecnologías que consiguen el almacenamiento de energía [3]:

- Sistemas de Almacenamiento Mecánico
- Sistemas de Almacenamiento Químico
- Sistemas de Almacenamiento Electroquímico

2.2. Beneficios del almacenamiento de energía

Los ESS además de ser el pilar fundamental para la transición hacia sistemas de generación renovables e inagotables, permitiendo así la no dependencia de los

combustibles fósiles, también ofrecen numerosos beneficios como los que se listan a continuación.

- Nivelación de carga

La nivelación de carga es la reprogramación de las cargas en los activos de generación para reducir los requisitos durante los períodos de alta demanda y aumentar la producción de energía durante los períodos de menor actividad para el almacenamiento inmediato y el uso posterior durante los períodos de alta demanda. Esta primera aplicación se llama afeitado máximo y consiste en almacenar electricidad durante el período de baja demanda y usarlo durante el período pico [4].

El siguiente gráfico muestra cómo el almacenamiento de energía puede eliminar la necesidad de una carga costosa y reemplazarla con un aumento en la capacidad de carga base más eficiente que opera continuamente en su nivel óptimo. Durante los períodos de baja demanda, el generador de carga base utiliza su exceso de capacidad para cargar la batería, y durante los períodos de alta demanda, la batería se descarga en la red.

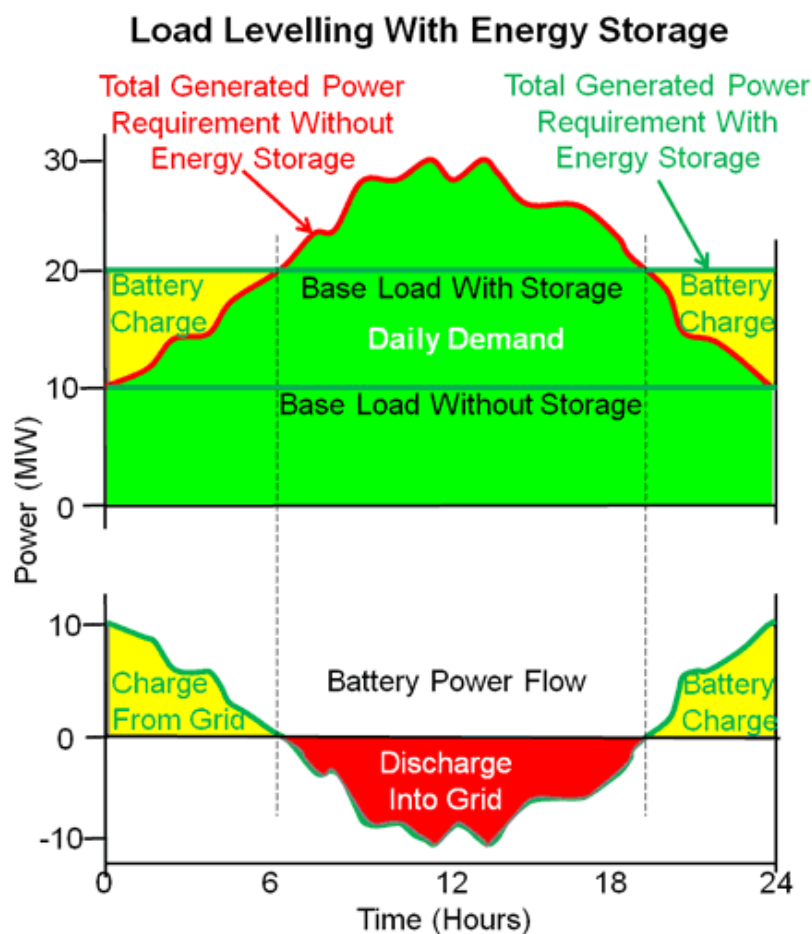


Ilustración 2. Nivelación de carga con el uso de ESS. [4]

De esta manera, las centrales térmicas de carga base más eficientes (es decir, carbón, petróleo, gas, nuclear) pueden asumir una mayor parte de la carga. La nivelación de carga reduce el costo de la generación pico y permite una fijación de precios más estable con menos variación entre las tasas pico y fuera de pico.

- Servicio Eléctrico Fiable y de Calidad

El almacenamiento de energía resulta un sistema indispensable y muy útil en caso de un fallo eléctrico o un corte de energía repentino.

Los ESS también pueden ayudar a mantener la seguridad y la calidad del servicio eléctrico cuando en ellos se experimentan situaciones de baja calidad como podrían ser las siguientes:

- Variaciones en la magnitud del voltaje
- Variaciones de frecuencia
- Bajo factor de potencia (voltaje y corriente excesivamente desfasados)

- Habilitación de fuentes renovables

Tanto la generación solar como la eólica son fuentes erráticas en su producción, dependientes del momento del día o de los factores climatológicos. Por otro lado, la intermitencia hace que la energía sea proporcionada en escalas de tiempo cortas. Un sistema de almacenamiento de energía adecuado suavizará dicha variabilidad al permitir que la electricidad no utilizada se almacene y sea usada posteriormente para satisfacer la demanda. [5]

Además, los sitios donde pueden encontrarse fuentes renovables de energía generalmente se encuentran a grandes distancias de los centros de consumo: sitios de máxima insolación solar, regiones con mayores valores de velocidad de viento, zonas de los océanos con mareas de alto oleaje o viento, etc. Para resolver estas limitaciones se deberán emplear sistemas viables de almacenamiento y transporte de energía. [6]

2.3. Tipos de Almacenamiento de Energía

En esta sección se explicarán algunos de los sistemas más utilizados para almacenar energía, clasificándolos en uno de los tres grupos que se mencionan en el apartado 2.1.

2.3.1. Sistemas de Almacenamiento Mecánico

2.3.1.1. Hidroelectricidad de almacenamiento por bombeo (Pumped-Storage Hydroelectricity)

Una planta de PSH consiste en dos depósitos: un depósito superior y depósito inferior. Durante los períodos de consumo de energía fuera del pico, una turbina reversible bombea el agua desde el depósito inferior al depósito superior (Ilustración 3). Por lo que, el depósito superior se llena con más agua. Cuando hay una gran demanda de energía, el agua se devuelve al depósito inferior para generar electricidad (Ilustración 4).

El PSH es muy eficiente. Considerando las pérdidas del agua evaporada y las pérdidas de conversión, se puede recuperar aproximadamente el 70 - 85% de la energía utilizada para bombear el agua al depósito superior [7].

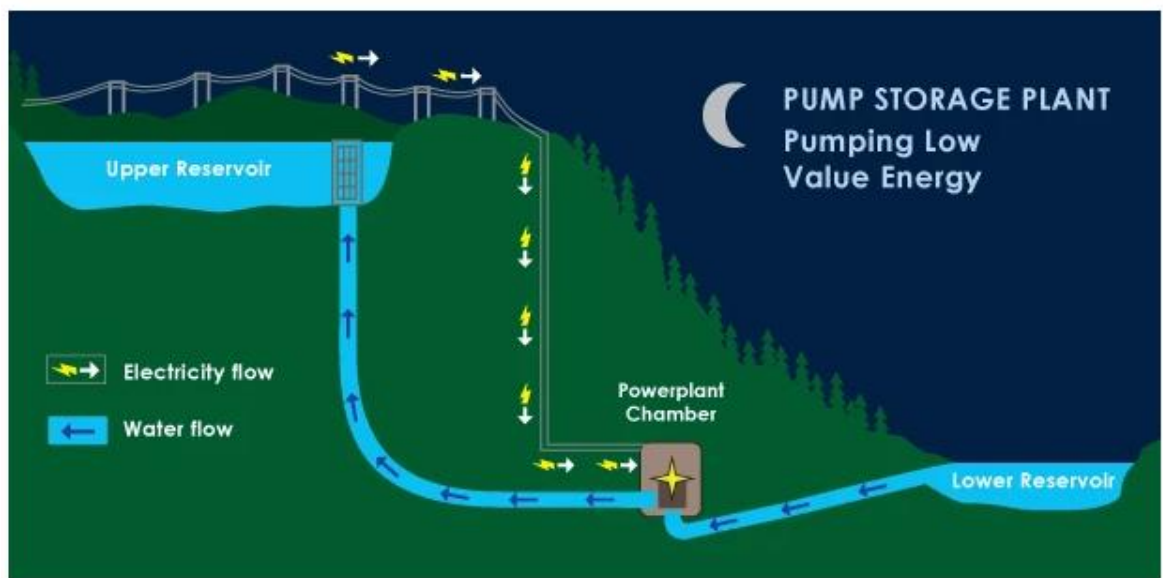


Ilustración 3. El agua se bombea cuesta arriba durante la noche. [56]

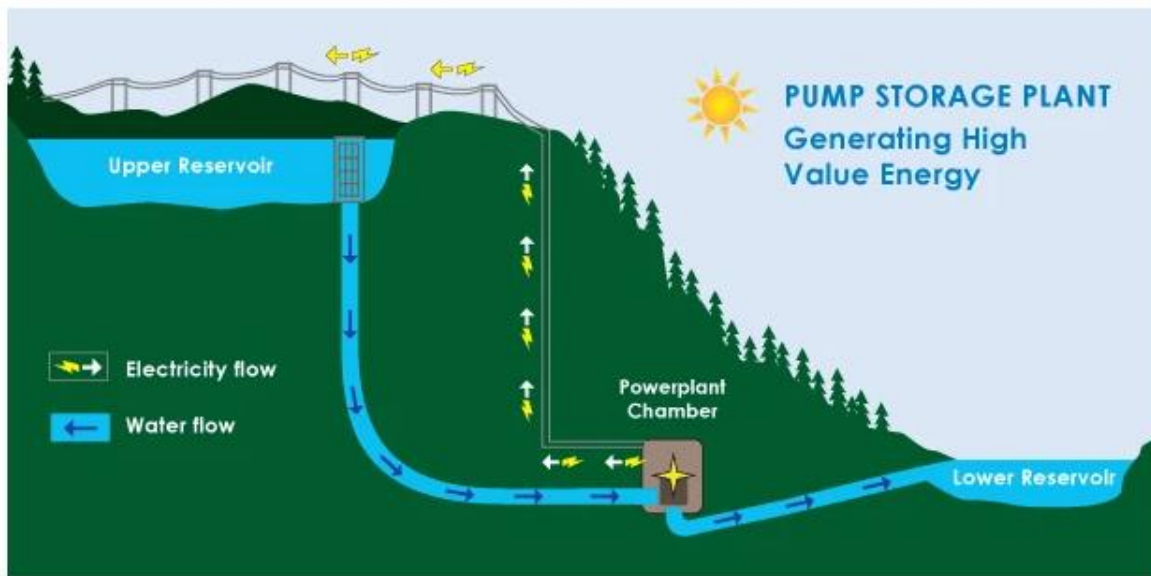


Ilustración 4. El agua fluye cuesta abajo durante las horas del día. [56]

2.3.1.2. Volantes de inercia (FES)

Los volantes de inercia FES (Flywheel Energy Storage), almacenan energía mediante la aceleración de un rotor (volante) a una velocidad muy alta y la energía se mantiene en el sistema como energía de rotación.

El sistema consiste en un rotor suspendido por rodamientos (magnéticos en los grandes sistemas) y en un recinto al vacío para reducir el rozamiento

Cuando la energía se extrae del sistema, la velocidad de rotación del volante se reduce como consecuencia del principio de conservación de la energía. Al inyectar energía al sistema resulta en un aumento de la velocidad del volante.

La velocidad de giro del volante va de 20.000 a más de 100.000 rpm en recintos al vacío. La eficiencia de estos sistemas puede llegar al 90%. [5]

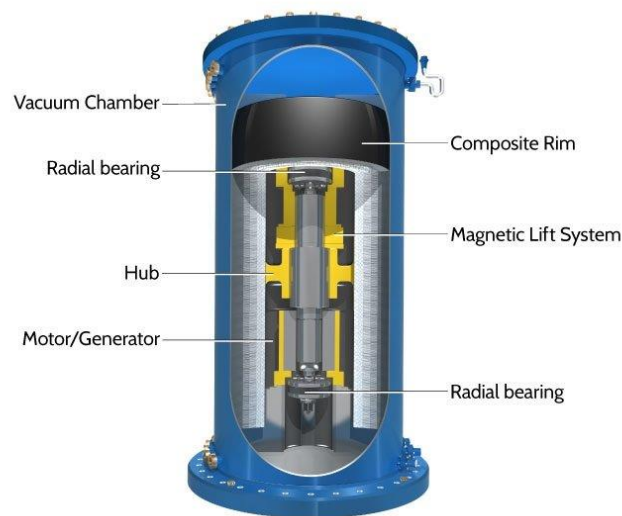


Ilustración 5. Componentes de un volante de inercia para el almacenamiento de energía. [57]

2.3.2. Sistemas de Almacenamiento Eléctrico

2.3.2.1. Supercondensadores

Los supercondensadores (SC), tienen un diseño que parte inicialmente del condensador convencional y consiste en dos placas conductoras (electrodos) separadas entre sí y rodeadas de un material aislante conocido como dieléctrico. La energía almacenada en los condensadores surge al conectar un campo eléctrico que provoca una diferencia de potencial y ésta a su vez polariza el medio dieléctrico, dando lugar a acumulación de cargas positivas en una cara y negativas en la otra. [8] Este comportamiento se observa en la siguiente figura:

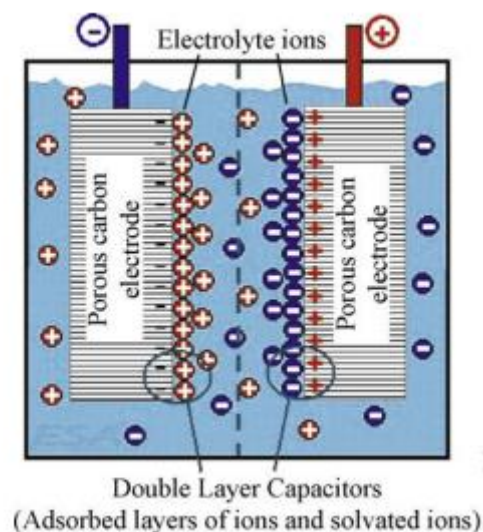


Ilustración 6. Principio de funcionamiento supercondensadores [8]

Los SC pueden entregar una alta potencia en muy poco tiempo, pero su cantidad de energía almacenada es baja. A diferencia de la batería electroquímica, existe muy poco desgaste inducido por el funcionamiento cíclico y el uso no afecta severamente al SC: éste puede soportar más de un millón de ciclos de carga y descarga [9].

Los SC no están destinados a reemplazar las baterías, sino a complementarlas en el manejo de sus desventajas a la hora de entregar energía. Así pues, los SC son ideales para aplicaciones que requieren una alta descarga de potencia desde unos pocos milisegundos hasta varios minutos.

2.3.3. Sistemas de Almacenamiento Electroquímico

Las características comunes que definen a este grupo son: eficiencia elevada y autodescarga considerable, sobretodo, comparada con otros tipos de almacenamiento como el hidráulico. Por ello son muy útiles en sistemas de almacenamiento a corto plazo que requieran cargas y descargas frecuentes. Por otro lado, su coste está más condicionado por la capacidad que por la potencia, ya que están más limitados por la cantidad de energía que almacenan que por la rapidez con la que pueden entregarla. [10]

Se pueden dividir en dos grandes grupos: baterías convencionales (plomo-ácido, Li-ion,...) y baterías de flujo.

2.3.3.1. Batería de Plomo-Ácido

El plomo-ácido es una de las tecnologías de batería más antiguas y más desarrolladas. Las baterías de plomo-ácido consisten en una serie de celdas conectadas entre sí, cada celda tiene un voltaje nominal de 2.1 V. Una celda está hecha de dos electrodos, uno de metal de plomo (Pb) y el otro de óxido de plomo (PbO₂), y ambos sumergidos en un electrolito de ácido sulfúrico (H₂SO₄).

Las baterías de plomo-ácido son una buena opción de almacenamiento de bajo coste, sin embargo, son muy limitadas debido a su corto ciclo de vida y su incapacidad para soportar descargas profundas. De hecho, una descarga completa provoca desgaste adicional, y cada ciclo de carga-descarga hace que la batería reduzca una pequeña parte de su capacidad.

Dependiendo de la profundidad de descarga y la temperatura de funcionamiento, las baterías de plomo-ácido proporcionan entre 200 y 1800 ciclos de carga y descarga [13]. Afortunadamente, tienen una buena eficiencia eléctrica, de 75 a 80% [27].

2.3.3.2. Batería de Ion de Litio

El litio es un metal ligero y con un mayor potencial electroquímico. Por lo tanto, las baterías de iones de litio tienen un alto voltaje en circuito abierto en comparación con baterías acuosas. El voltaje promedio de la celda es de 3.6 V.

Las baterías de ion-Litio poseen la configuración típica de una batería convencional consistente en dos electrodos diferenciados a través de un separador, con un electrolito donde los iones de litio se mueven desde el cátodo hacia el ánodo durante el proceso de carga y, por el contrario, durante la descarga los iones van desde el electrodo negativo hacia el positivo. (Ilustración 7). [12] El cátodo de este tipo de baterías consiste en un óxido metálico de litio, el ánodo está construido por un material de carbono (grafito) y el electrolito se trata de una disolución de sales de litio.

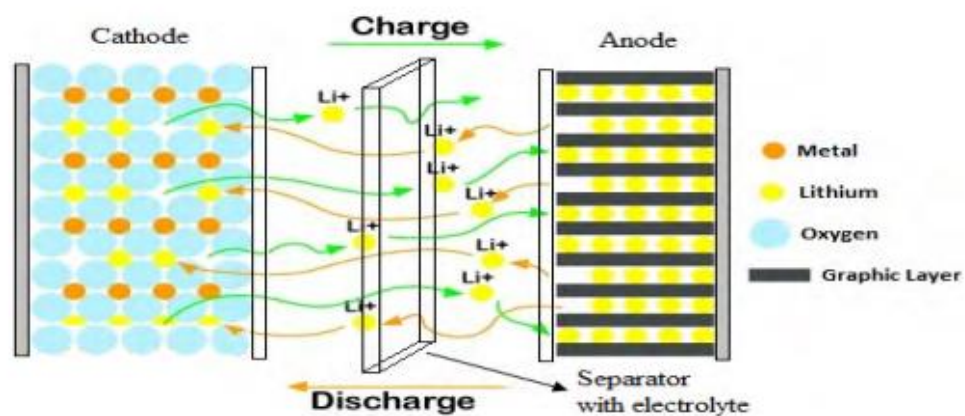


Ilustración 7. Proceso carga-descarga de una batería de Litio. [12]

Las baterías de iones de litio proporcionan la mayor densidad de energía (300 - 400 Wh / l). Además, suelen tener un ciclo de vida largo, 2500 ciclos al 80% de profundidad de descarga. [11].

2.3.3.3. Batería de Flujo

Las baterías de flujo (BF) son la segunda categoría de sistemas de almacenamiento electroquímico. Este tipo de baterías representan una de las tecnologías más recientes y una opción prometedora para el almacenamiento estacionario de energía. [15]

Una batería redox se refiere a un sistema electroquímico que genera oxidación y reducción entre dos materiales activos, formando un sistema redox, en la superficie de los electrodos inertes (los electrodos en sí no cambian). [15]

Las BF difieren de las baterías convencionales en dos principales aspectos:

- La reacción ocurre entre dos electrolitos, en lugar de entre un electrolito y un electrodo. Por lo tanto, no se produce electrodeposición o pérdida de sustancias electro-activas cuando la batería se recicla repetidamente.
- Los electrolitos se almacenan en tanques externos y circulan a través del apilamiento de celdas.

En la siguiente figura se ven las características anteriormente citadas.

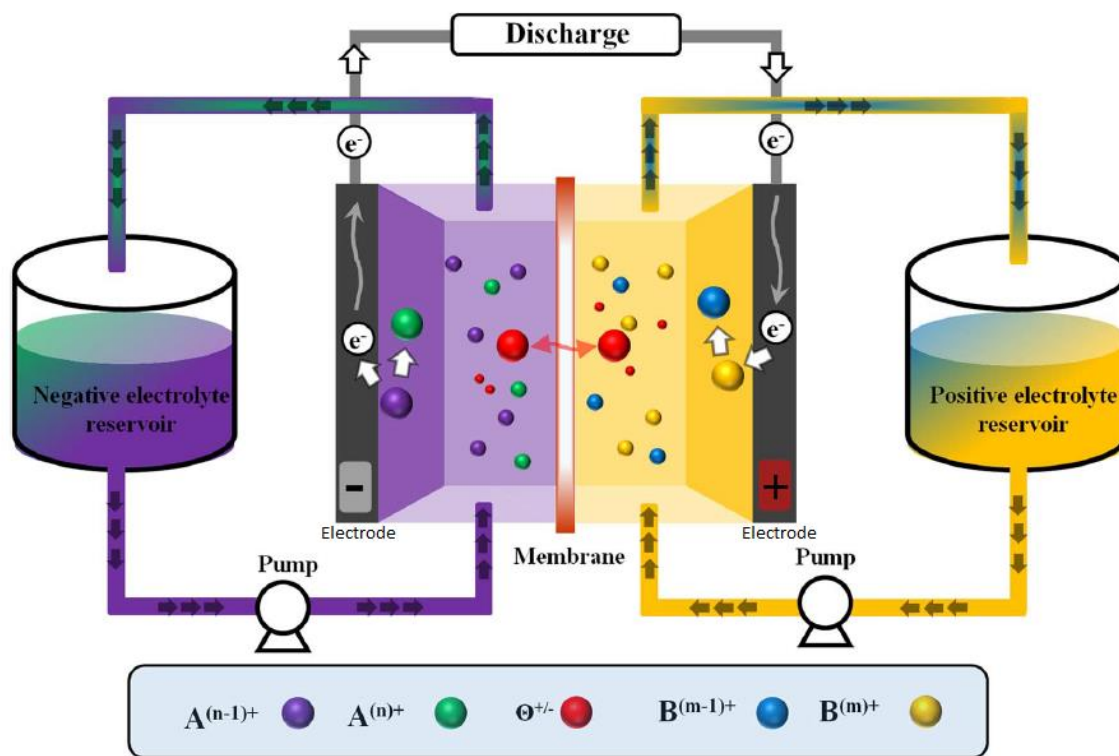


Ilustración 8. Representación esquemática de una BF mono-celda. La celda y los tanques están separados. [16]

Los dos elementos clave son la pila de celdas, donde la energía química se convierte en electricidad en un proceso reversible, y los tanques de electrolitos donde se almacena la

energía. Estos dos elementos se complementan con los sistemas de circulación y control que hacen fluir respectivamente los electrolitos desde los tanques a las celdas electroquímicas.

Una celda individual consta de un electrodo negativo y un electrodo positivo separados por una membrana de intercambio iónico. Las celdas individuales se apilan juntas y se conectan eléctricamente en serie para lograr un voltaje más alto. [17]

Sin embargo, el caudal Q impulsado por las bombas, se puede hacer pasar por la pila de celdas en paralelo o en serie, aunque lo más común es hacerlo en paralelo cosa que permite deducir más fácilmente las concentraciones de electrolitos en cada celda, tal y como se verá en el punto 3.

El electrolito contiene una o más especies electro-activas disueltas. La característica importante de estas BF es que los electrodos no participan en las reacciones. Por lo tanto, no hay pérdida de rendimiento, como es el caso en la mayoría de las baterías recargables, debido a ciclos repetidos que causan el deterioro del material del electrodo.

Además, las baterías de flujo se pueden dividir en dos categorías [17]:

- *Redox Verdadero*, donde todas las especies químicas activas en el almacenamiento de energía se encuentran completamente disueltas en solución en todo momento (vanadio / vanadio, hierro / cromo).
- *Redox híbrido*, donde al menos una especie química se deposita como un sólido (zinc) en las células electroquímicas durante la carga (zinc / bromo, zinc / cloro).

La característica más importante de la BF es quizás la modularidad de su potencia y de energía que son independientes entre sí.

La potencia se define por el tamaño y el número de celdas, mientras que la capacidad energética se establece por la cantidad de electrolito almacenado en los depósitos.

De esta manera, el comportamiento modular de estas baterías se muestra en la siguiente figura.

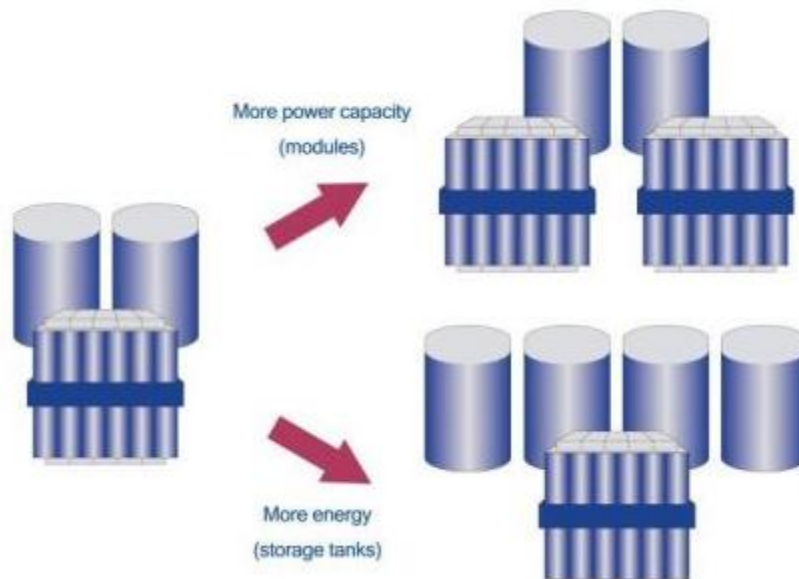


Ilustración 9. Baterías de flujo, modularidad de energía y potencia. [18]

Finalmente se enumeran las principales ventajas y desventajas de este tipo de almacenamiento de energía. [19] [20]

VENTAJAS

- Tecnología escalable y modulable gracias a la independencia de las características de energía y potencia.
- Vida útil elevada: superior a 10.000 ciclos.
- Elevadas tasas de descarga.
- Seguridad térmica: el flujo de los electrolitos reduce el calor de la celda.
- Se recargan rápidamente sustituyendo el electrolito o revertiendo la reacción redox.
- Bajo mantenimiento.
- El funcionamiento de la batería se puede detener simplemente apagando las bombas.
- Tiempos de respuesta rápidos, del orden de milisegundos.
- Pueden operar a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente.

DESVENTAJAS

- Baja densidad de energía en comparación con otros sistemas.
- Requisitos de sistema más complicados de bombas, sensores, gestión de flujo.
- Elevado tamaño del conjunto, sobre todo el volumen que pueden llegar a alcanzar los tanques de almacenamiento del electrolito.
- Muchos aspectos de la tecnología aún por desarrollar.
- Las corrientes derivadas (pérdidas) que aparecen debido a la forma en la que se construye la batería de celdas.

3. BATERÍAS DE FLUJO REDOX DE VANADIO (VRFB)

La batería de flujo redox de vanadio es uno de los sistemas de almacenamiento más desarrollados de entre todas las baterías de flujo. La energía se almacena mediante iones cargados que se encuentran en dos tanques de electrolito separados, de forma que uno de ellos contiene electrolito para las reacciones de electrodo positivo y el otro para las reacciones de electrodo negativo.

El mecanismo de una VRFB implica reacciones reversibles en la celda que son alimentadas por vanadio iónico activo proveniente de los tanques, dando como resultado la transferencia de electrones en el circuito. Los electrolitos se componen de dos parejas redox: en el electrodo negativo se encuentra el par V^{2+}/V^{3+} y en el positivo V^{5+}/V^{4+} . Estos se encuentran disueltos normalmente en ácido sulfúrico (H_2SO_4) y son bombeados hacia la celda en el momento en el que la batería se pone en funcionamiento.

El uso del vanadio se basa en la capacidad de estar presente en cuatro estados de oxidación diferentes, permitiendo tener un único material activo en la batería [21]. Esto a su vez al darse el hecho de que los electrolitos son del mismo compuesto, evita el riesgo de contaminación a través de la membrana de separación y alarga considerablemente la vida útil del electrolito. [22] [23]

La celda de este tipo de baterías está constituida, de igual manera que el resto de las baterías de flujo, por dos electrodos de carbono o grafito que transmiten o recogen los electrones y por una membrana ion selectiva que los separa y evita la mezcla de electrolitos activos. Este diseño mantiene las especies de iones reactivos en ambos lados de la celda, al tiempo que permite a los iones de hidrógeno (H^+) atravesar la membrana para mantener la neutralidad eléctrica del sistema. [19]

A continuación se muestra un esquema de una batería de flujo de vanadio de una sola celda. Mostrando hacia donde circulan los electrones tanto en el proceso de carga (a) como en el de descarga (b).

Durante el proceso de carga, el V^{4+} se oxida y se convierte en V^{5+} liberando un electrón. Este electrón se transfiere del ánodo al cátodo a través del circuito externo y reduce V^{3+} a V^{2+} en el otro electrodo. En la descarga, la oxidación de V^{2+} a V^{3+} tiene lugar en el ánodo y el electrón liberado de V^{2+} se mueve al lado del cátodo y reduce V^{5+} a V^{4+} .

En resumen, las reacciones químicas que se llevan a cabo en la celda de la batería son las siguientes. La reacción de arriba corresponde al electrodo positivo y la de abajo al negativo.

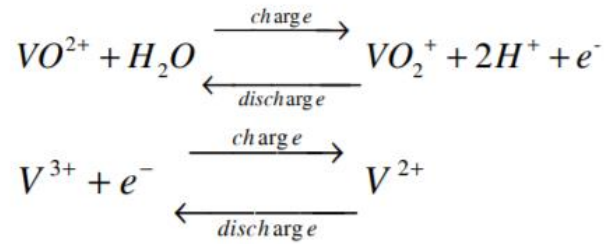


Ilustración 10. Reacciones químicas en la celda de una VRFB. [25]

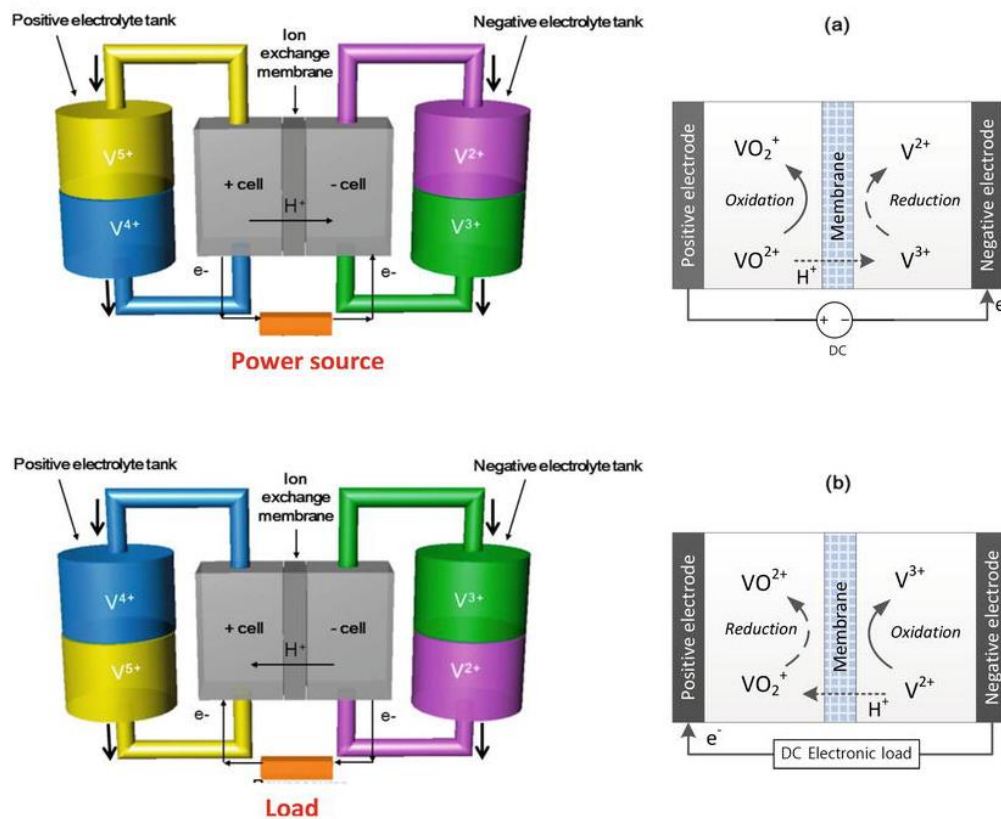


Ilustración 11. Proceso de carga y descarga VRFB. [24] (a) carga; (b) descarga

Consecuentemente con lo explicado y las reacciones químicas que se llevan a cabo en la celda de la VRFB, se muestra una tabla con la variación en la concentración de los diferentes iones de vanadio para el proceso de carga y descarga.

	Charge	Discharge
V^{2+}	↑	↓
V^{3+}	↓	↑
VO^{2+}	↓	↑
VO_2^+	↑	↓

Ilustración 12. Variación de la concentración de los iones de vanadio en el proceso de carga y descarga. [26]

Algunas desventajas de esta tecnología son:

- Baja densidad de energía.
- Alto coste del vanadio.
- La naturaleza altamente oxidante del V^{5+} , que puede causar degradación de la membrana.
- Corrientes derivadas (pérdidas).

Sin embargo se compensan con una gran cantidad de beneficios como los que se listan a continuación: [27]

- Las soluciones tienen una vida indefinida, por lo que solo los componentes mecánicos necesitan reemplazo al final de su vida útil.
- La recarga instantánea es posible al reemplazar los electrolitos gastados, lo que hace que el sistema sea ideal para aplicaciones de vehículos eléctricos.
- La capacidad del sistema puede aumentarse aumentando el volumen de la solución.
- La batería de vanadio se puede descargar completamente sin ningún efecto perjudicial.
- El costo por kWh disminuye a medida que aumenta la capacidad de energía, lo que

hace que las aplicaciones a gran escala sean rentables.

- La capacidad de todo el sistema se puede monitorear en línea monitoreando el estado de carga de los electrolitos.
- El sistema de batería de vanadio es ecológico ya que no se producen productos de desecho.
- Las pérdidas por corrientes derivadas sólo afectan a la eficiencia energética, no como en otras BF como de ZnBr donde puede incurrir en corrosión y deposición en los electrodos.

3.1. Modelo y ecuaciones

El modelo electroquímico en el que se ha basado este trabajo para estudiar el comportamiento de la batería es el que aparece a continuación. [28] Las diferentes ecuaciones diferenciales que aparecen permiten modelar las concentraciones en las celdas de los diferentes estados de oxidación del vanadio.

Estas ecuaciones muestran las concentraciones de las especies de vanadio en las celdas en función de la corriente que atraviesa éstas y el caudal de la disolución.

Hay que tener en cuenta las siguientes suposiciones: [29]

- El caudal de la disolución en cada celda es idéntico.
- Los tanques y las celdas están completamente llenos de electrolitos.
- El electrolito en el tanque está bien mezclado, por lo que la concentración de electrolito en el tanque o celda es idéntica en todas partes.
- Las reacciones secundarias a través de la membrana son instantáneas, lo que significa que solo hay iones V^{2+} y V^{3+} en la media celda negativa y solo VO^{2+} y VO_2^+ en media celda positiva.
- La temperatura es constante.
- La corriente de signo positivo carga la batería y al cambiarle de signo, descarga la batería.

$$\frac{V_{cell}}{2} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} c_2^{cell} \\ c_3^{cell} \\ c_4^{cell} \\ c_5^{cell} \end{pmatrix} = \frac{1}{zF} \begin{pmatrix} I \\ -I \\ -I \\ I \end{pmatrix} + Q_{cell} \begin{pmatrix} c_2^{cell} & c_2^{tank} \\ c_3^{cell} & c_3^{tank} \\ c_4^{cell} & c_4^{tank} \\ c_5^{cell} & c_5^{tank} \end{pmatrix} + \frac{A_m}{d_m} \begin{pmatrix} -D_2 & 0 & -D_4 & -2D_5 \\ 0 & -D_3 & 2D_4 & 3D_5 \\ 3D_2 & 2D_3 & -D_4 & 0 \\ -2D_2 & -D_3 & 0 & -D_5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_2^{cell} \\ c_3^{cell} \\ c_4^{cell} \\ c_5^{cell} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Para el caso del comportamiento de las concentraciones en el interior del tanque, se rigen por las siguientes ecuaciones diferenciales.

$$V_{tank} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} c_2^{tank} \\ c_3^{tank} \\ c_4^{tank} \\ c_5^{tank} \end{pmatrix} = n \cdot Q_{cell} \begin{pmatrix} c_2^{cell} & c_2^{tank} \\ c_3^{cell} & c_3^{tank} \\ c_4^{cell} & c_4^{tank} \\ c_5^{cell} & c_5^{tank} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Las variables que aparecen en (3.1) y en (3.2) se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Variables, constantes y sus valores

V_{cell}	Volumen de la celda	[m ³]	Subíndice i	Iones de Vanadio
c_i^{cell}	Concentración del ion i a la salida de la celda	[mol/m ³]	2	V ²⁺
F	Constante de Faraday	96485 [C/mol]	3	V ³⁺
z	Número de electrones transferidos	1	4	VO ²⁺
I	Corriente que atraviesa la celda	[A]	5	VO ₂ ⁺
Q_{cell}	Flujo de la disolución que atraviesa la celda	[m ³ /s]		
c_i^{tank}	Concentración del ion i en el tanque	[mol/m ³]		
A_m	Área de la membrana	[m ²]		
d_m	Grosor de la membrana	[m]		
D_i	Coefficiente de difusión del ion i	[m ² /s]		
n	Número de celdas conectadas en serie por pila de celdas	-		

Hay que considerar que la parte de la ecuación que tiene en cuenta la difusividad del vanadio con los respectivos coeficientes de difusión, también depende del área activa por la que pasará la disolución y del grosor de la membrana. Los coeficientes de difusión de cualquier especie química dependen de la temperatura y la porosidad del medio de

difusión. En este trabajo, la influencia de la temperatura no se considerará.

Los valores de las constantes y parámetros que aparecen en la tabla anterior se obtienen de [29] ya que están basados en un tipo concreto de membrana. Además se necesita especificar estos valores para las simulaciones y ejemplos de comportamiento de la batería que se muestran más adelante.

Con el objetivo de facilitar los cálculos, en todo momento se considerará que los tanques, tanto el del cátodo como el del ánodo, están igual de cargados. Esto significa que en todo momento, la concentración de los iones $V^{2+}(c_2)$ y $VO^{+}_2(c_5)$ será igual, tanto del tanque como de la celda. Lo mismo sucede con las concentraciones de los iones $V^{3+}(c_3)$ y $VO^{2+}(c_4)$.

3.1.1. Estado de Carga

Esto abre una vía al uso de las concentraciones en los tanques c_i^{tank} de los diferentes iones para calcular en todo momento cómo de cargada se encuentra la batería. A este valor se le llama *estado de carga* (SOC, *state of charge*), y depende de la concentración total de vanadio en la disolución c_v .

Según si se obtiene con las concentraciones del electrodo (en descarga) negativo o positivo, se calcula de la siguiente manera.

$$SOC = \frac{c_2^{tank}}{c_2^{tank} + c_3^{tank}} = \frac{c_2^{tank}}{c_v} \quad ; \quad SOC = \frac{c_5^{tank}}{c_5^{tank} + c_4^{tank}} = \frac{c_5^{tank}}{c_v} \quad (3.3)$$

Así pues, también se puede calcular todas las concentraciones en los tanques en función del SOC.

$$c_2^{tank} = c_5^{tank} = c_v * SOC \quad (3.4)$$

$$c_3^{tank} = c_4^{tank} = c_v * (1 - SOC)$$

Hay que tener en cuenta que los diferentes valores que puede tener el SOC varían teóricamente desde 0, cuando la batería está descargada, hasta 1, cuando está cargada. En la práctica, no se alcanzarán esos extremos ya que provocarían divisiones entre 0, por ese motivo las simulaciones llegarán hasta valores cercanos a estos.

3.1.2. Voltaje de la celda

El valor del voltaje de cada celda es muy importante y característico de este tipo de baterías, puesto que además es un mero indicador de la potencia de la pila de celdas. En este caso, el voltaje de la celda se calcula de la siguiente manera. [28] [29] [30] [31]

$$E_{cell} = E_{formal} + \frac{RT}{zF} \ln \left[\frac{c_2^{cell} \cdot c_5^{cell}}{c_3^{cell} \cdot c_4^{cell}} \right] \quad (3.5)$$

Donde E_{formal} denota el potencial estándar de la celda al 50% SOC. Su valor es 1.4V a 25 °C [30]. R es la constante universal de los gases considerada 8.31 J/(mol·K), F es la constante de Faraday, T es la temperatura que será de 298 K en todo momento de este trabajo y finalmente z hace referencia a los electrones transferidos, que es 1.

3.1.3. Construcción de la pila de celdas

La pila de celdas, está ensamblada por varias celdas individuales que están conectadas eléctricamente por placas bipolares en serie para lograr un voltaje más alto.

En cuanto a la elección de cómo hacer pasar el flujo a través de la celda, existen dos posibilidades, en serie o paralelo, en esta imagen se muestra el esquema que resultaría de ambas posibilidades. Podemos observar que todo el flujo pasa de una celda a la siguiente en la conexión en serie, sin embargo en una tipología paralelo, el flujo se divide entre las celdas.

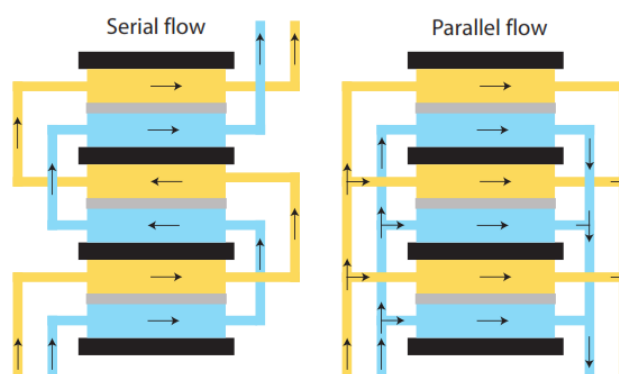


Ilustración 13. Esquemas del flujo de electrolitos. Izquierda: flujo en serie. Derecha: flujo en paralelo [26]

En una configuración en serie, se necesita más potencia para hacer fluir el electrolito

porque por cada celda debe circular todo el flujo Q , por el contrario, Q se divide entre las celdas en la configuración paralela. Además, la caída de presión en la estructura serie, es muy elevada, por eso se opta en la mayoría de pilas de celdas por realizar la configuración paralelo para el flujo. El esquema pues, sería el siguiente.

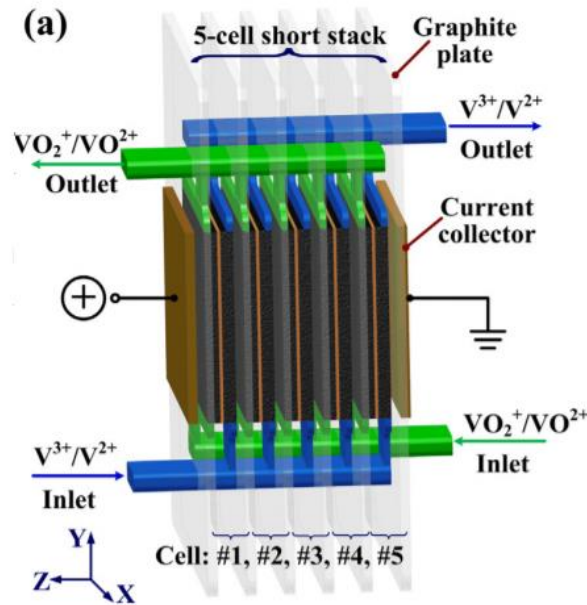


Ilustración 14. Estructura geométrica del modelado de una VRFB con una pila de 5 celdas. [32]

Siguiendo con este esquema, el voltaje total de la pila de celdas y por consiguiente, su potencia total se calculan de la siguiente manera. Teniendo en cuenta la cantidad de celdas en serie conectadas n .

$$E_{stack} = n * E_{cell} \quad (3.6)$$

$$P_{stack} = E_{stack} * I$$

Nótese pues, que la potencia P depende de dos principales variables, el caudal de electrolitos Q , ya que de éste dependen las concentraciones de los iones de vanadio en las celdas, y de la intensidad I . Más adelante se podrá ver esta dependencia gráficamente.

3.1.4. Corriente de derivación (pérdidas)

Tal y como se menciona en el punto anterior, para obtener un voltaje de batería razonable, se han de conectar varias celdas eléctricamente en serie. La desventaja de combinar una conexión en serie eléctrica y una conexión paralela hidráulica es la aparición de corrientes de derivación.

Dentro de una pila, los colectores (manifold) a través de los canales suministran electrolito a las celdas. Por lo tanto, la ruta del electrolito conecta las celdas con diferentes potenciales eléctricos entre sí. Como el electrolito es un buen conductor iónico, las corrientes de derivación aparecen. [33]

Usando dicha ruta de suministro de electrolitos a las celdas, los protones de hidrógeno pueden saltar una o varias celdas. Por lo tanto, no participan en la reacción electroquímica deseada aquellas celdas omitidas. Esa energía no utilizada para cargar la batería, se convierte en calor y, por lo tanto, se pierde para el funcionamiento de la batería. En definitiva, las corrientes de derivación disminuyen la eficiencia de la batería.

Lo que se intenta en muchas ocasiones es aumentar las resistencias, sobretudo de los canales R_{Ch} , alargándolos. De esta manera evitar dichos saltos de los protones a pesar de que conlleve una mayor caída de presión.

Ahora se muestra el esquema del suministro de la disolución de electrolitos negativos de una pila de dos celdas, así como su circuito eléctrico equivalente.

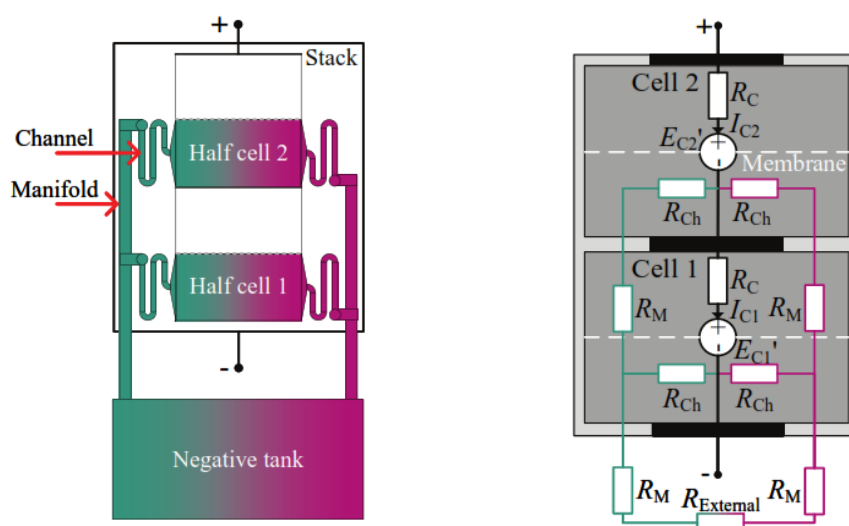


Ilustración 15. Esquema del suministro de electrolito y su equivalente eléctrico para pila de dos celdas. [33]

El circuito eléctrico equivalente, contiene la resistencia de la celda (R_C), así como las resistencias efectivas de los colectores (R_M), los canales (R_{Ch}) y los circuitos hidráulicos externos (tanques, tuberías, etc. - $R_{External}$).

Si bien se supone que la resistencia de la celda es constante, las resistencias de los colectores y los canales dependen de la conductividad del electrolito, y ésta varía con el SoC. En general la corriente de derivación es más grande conforme mayor es el SOC. [28]

Esta corriente de derivación aumenta conforme aumenta la cantidad de celdas conectadas en serie, o conforme aumentan las pilas de celdas conectadas en serie (stacks). Su valor suele oscilar de entre 1A hasta alrededor de 6A.

Una de las ventajas de las VRFBs es que, a diferencia de otros tipos de baterías de flujo, como la batería de zinc-bromo, en la que puede producirse corrosión y deposición en los electrodos como resultado de la corriente de derivación, los sistemas de baterías de flujo de vanadio sufren pérdida de potencia en el rendimiento de la pila. Esto se debe a tener las mismas especies a ambos lados de la celda.

3.1.5. Flujo mínimo, Q_{min}

El flujo de disolución es la velocidad de suministro de reactivos a las celdas, donde se llevan a cabo las reacciones químicas.

El diseño de los canales para la minimización de la corriente de derivación también puede tener un impacto negativo en las pérdidas de energía por bombeo, por lo que se necesita un equilibrio entre el diseño de la pila de celdas como de la optimización del flujo para reducir las pérdidas y lograr una alta eficiencia del sistema.

En tales circunstancias, es más deseable un flujo variable, ya que puede ahorrar energía de bombeo durante las etapas inicial y media tanto de carga como de descarga, al tiempo que reduce significativamente el exceso de sobretensión al final. [35]

Sin embargo, deducir la ecuación para la obtención de dicho flujo no es en absoluto sencillo. Si el flujo no es suficiente, la capacidad de los electrolitos no se utiliza por completo. Si el flujo es demasiado alto, las pérdidas por bombeo aumentan y la eficiencia general del sistema se reduce en consecuencia.

En este trabajo, se ha querido centrar la atención en el flujo mínimo. Dependiendo de si se está en un proceso de carga (a) o de descarga (b), interesa que reaccione un tipo de ion de vanadio u otro. También se puede ver en la Ilustración 11. Si se está en el caso (a) interesa

que reaccionen totalmente los iones V^{3+} y VO_2^{2+} , (c_3^{tanque} y c_4^{tanque}) que han sido bombeados desde sus respectivos tanques y entran en la celda. Para el caso contrario, (b), interesa que reaccionen los iones V^{2+} y VO_2^{+} , (c_2^{tanque} y c_5^{tanque}).

Así pues, conociendo la ecuación que indica la concentración de salida de la celda de cada ion de vanadio en función de la concentración de entrada de éste y tanto de la intensidad como del flujo total. [28]

$$c_{out,i} = c_{in,i} \pm \frac{n * I}{z * F * Q_{n-cells}} \quad (3.7)$$

Se llega a la conclusión de que el flujo de disolución mínimo Q_{min} que se tendrá que bombear hacia la pila de celdas, será aquel que provoque que en el flujo de salida de cada celda ya no queden iones de vanadio de los que interesa que reaccionen tanto en (a) como en (b), es decir, que todos los que han entrado en la celda provenientes del tanque, hayan reaccionado químicamente según Ilustración 10.

Así pues, eso se cumplirá cuando $c_{out,i} = 0$. Por lo tanto se obtiene la siguiente expresión.

$$Q_{min} = \pm \frac{n * I}{z * F * c_{in,i}} \quad (3.8)$$

Teniendo en cuenta que $c_{in,i}$ es la concentración del ion de vanadio i a la entrada de la celda y que equivale a la concentración del mismo ion i en el tanque, y sabiendo (3.4), se obtienen las diferentes formas de obtener Q_{min} en función del SOC, según si se está en un proceso de carga o descarga. Se recuerda que se considera proceso de carga de batería cuando la intensidad es positiva, y de descarga cuando es negativa.

CARGA

DESCARGA

$$Q_{min} = \frac{n * I}{z * F * (1 - SOC) * c_v} \quad Q_{min} = \frac{-n * I}{z * F * SOC * c_v} \quad (3.9)$$

En el posterior apartado se observa gráficamente cómo varía este Q_{min} , según los valores del SOC y de la intensidad. Flujo mínimo, Q_{min} .

3.1.6. Ecuaciones de equilibrio y gráficas

El punto de equilibrio de un sistema es una solución constante de la ecuación diferencial que lo gobierna. Para encontrar un punto de equilibrio, la derivada respecto del tiempo de la ecuación diferencial debe ser igual a cero. Esto implica que en ese punto, el sistema no cambia a lo largo del tiempo, por lo que es estacionario en lugar de transitorio. Los puntos matemáticos que permiten que esto suceda configuran el llamado estado estacionario. [35]

Así pues, trabajando con (3.1), se impone lo siguiente.

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} c_2^{cell} \\ c_3^{cell} \\ c_4^{cell} \\ c_5^{cell} \end{pmatrix} = 0$$

Por lo que resulta:

$$0 = \frac{1}{zF} \begin{pmatrix} I \\ -I \\ -I \\ I \end{pmatrix} + Q_{cell} \begin{pmatrix} c_2^{cell} & c_2^{tank} \\ c_3^{cell} & c_3^{tank} \\ c_4^{cell} & c_4^{tank} \\ c_5^{cell} & c_5^{tank} \end{pmatrix} + \frac{A_m}{d_m} \begin{pmatrix} -D_2 & 0 & -D_4 & -2D_5 \\ 0 & -D_3 & 2D_4 & 3D_5 \\ 3D_2 & 2D_3 & -D_4 & 0 \\ -2D_2 & -D_3 & 0 & -D_5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_2^{cell} \\ c_3^{cell} \\ c_4^{cell} \\ c_5^{cell} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

La resolución de las ecuaciones de (3.10) se realiza algebraicamente a través de MATLAB y el solucionador simbólico de sistemas. Ahora que las ecuaciones para los puntos de equilibrio están disponibles, es interesante ver cómo varían las concentraciones para cada especie en cada punto de equilibrio.

Antes de realizar las gráficas, se muestran los datos que restaban por definirse.

Tabla 2. Constantes para la resolución de los puntos de equilibrio. [29]

A_m	0,02 [m ²]	D_2	$4,4380 \cdot 10^{-12}$ [m ² /s]
d_m	0,00014 [m]	D_3	$1,0024 \cdot 10^{-12}$ [m ² /s]
c_v	$2 \cdot 10^3$ [mol/m ³]	D_4	$3,8000 \cdot 10^{-12}$ [m ² /s]
n	40	D_5	$1,7500 \cdot 10^{-12}$ [m ² /s]

3.1.6.1. Concentraciones en celda

Para la obtención de las gráficas, se hacen diferentes iteraciones en MATLAB (código disponible en los anexos) en las cuales se varía el valor del flujo Q desde $2 \cdot 10^{-6}$ hasta $5 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^3/\text{s]}$ en pasos de $5 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Para el caso de la intensidad se varía de 0 hasta 120 A, en pasos de 1 A. Las primeras gráficas muestran los puntos de equilibrio de las concentraciones en la celda para los 4 tipos diferentes de iones de vanadio para un SOC del 15% y posteriormente se realizan para un SOC del 85%, donde se aprecia claramente la diferencia de concentraciones en los iones que predominan en cada caso, según Ilustración 12.

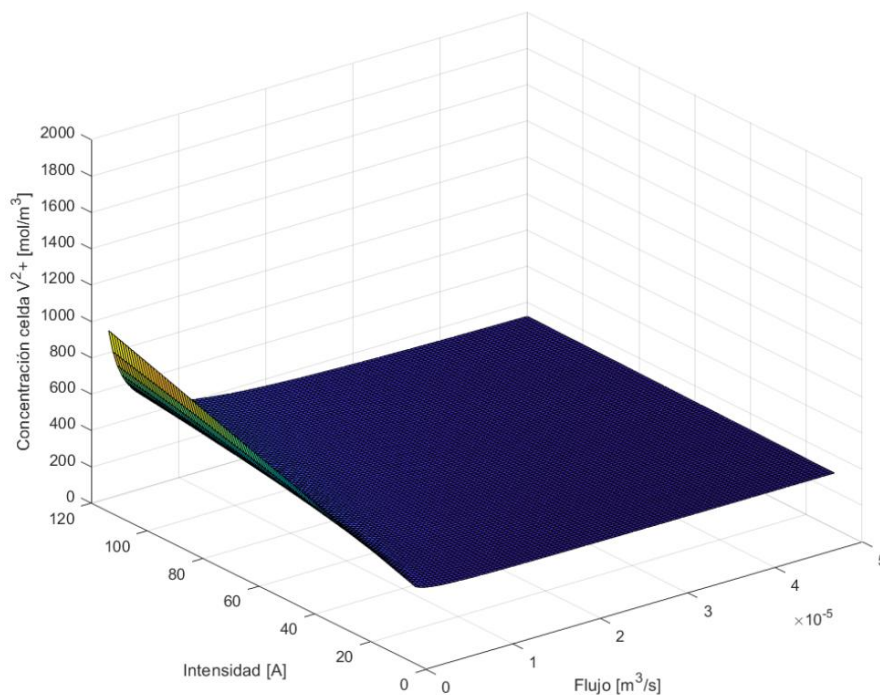


Ilustración 16. Puntos de equilibrio de V^{2+} para 15% SOC.

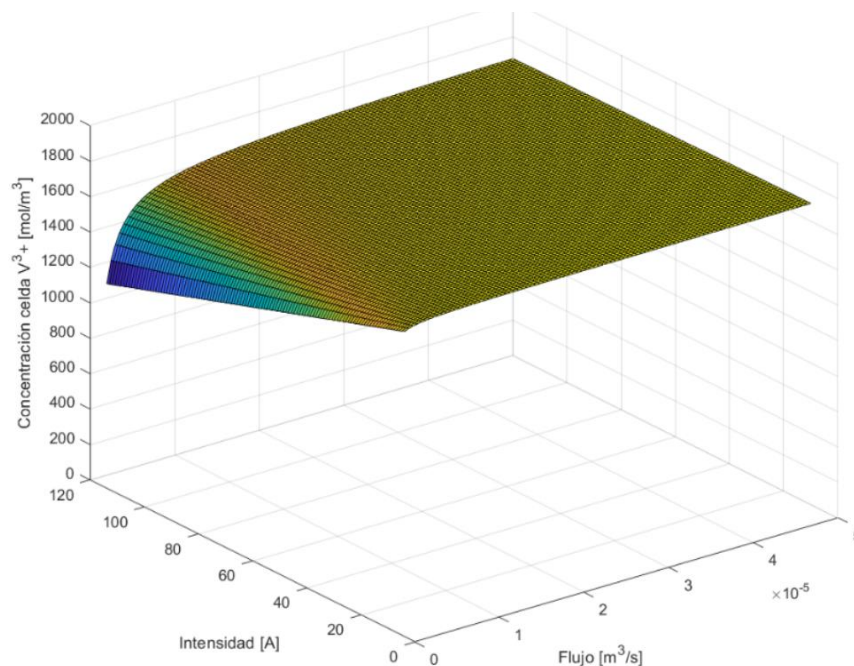


Ilustración 17. Puntos de equilibrio de V^{3+} para 15% SOC.

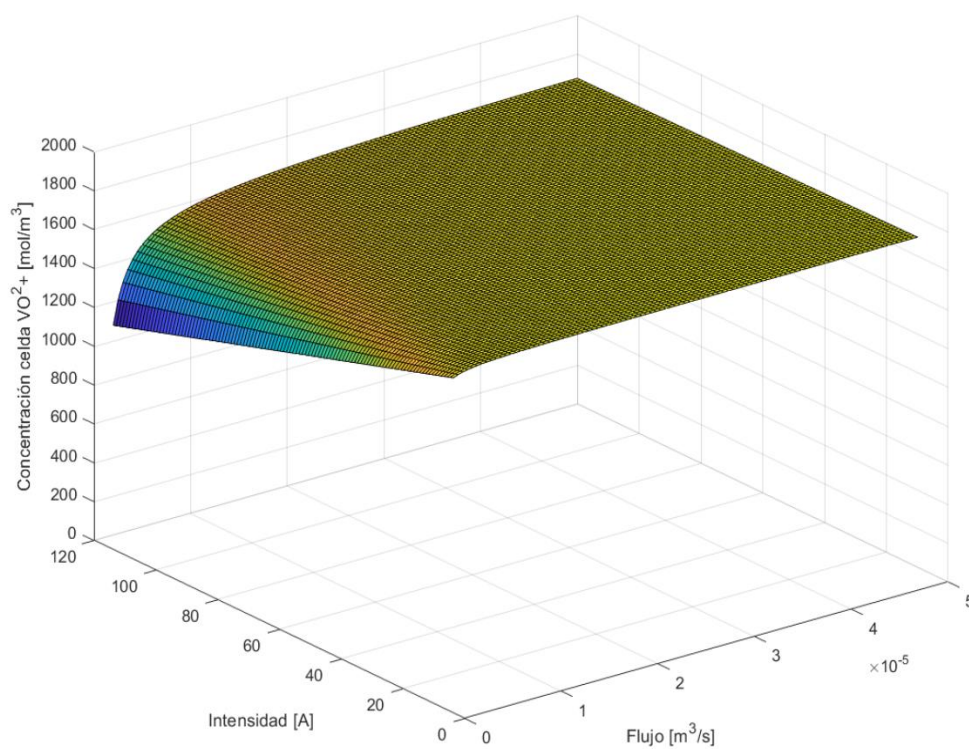


Ilustración 18. Puntos de equilibrio de VO_2^+ para 15% SOC.

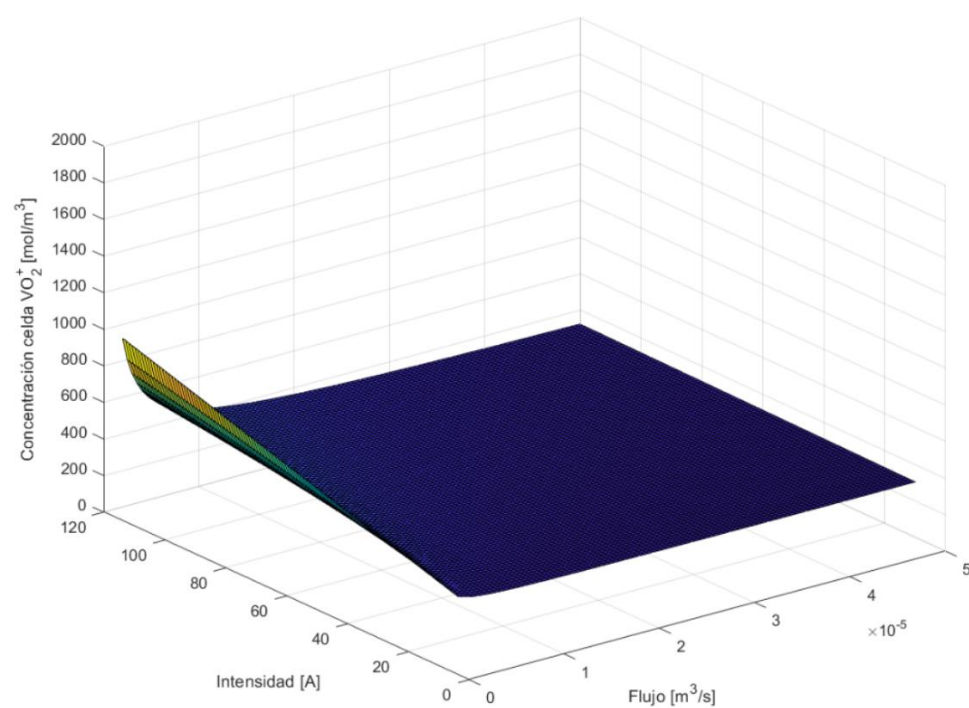


Ilustración 19. Puntos de equilibrio de VO_2^+ para 15% SOC.

Este primer conjunto de superficies están representadas para un estado de carga del 15%, lo que quiere decir que $c_2^{\text{tank}} = c_5^{\text{tank}} = 300 \text{ mol/m}^3$ y que $c_3^{\text{tank}} = c_4^{\text{tank}} = 1700 \text{ mol/m}^3$.

La superficie permanece prácticamente plana en la mayoría de los puntos de corriente y flujo, a un valor de concentración cercano al de la concentración del tanque: 300 mol/m^3 en las Ilustraciones 19 y 16, y de 1700 mol/m^3 en la 17 y 18. Sin embargo, a un flujo lo suficientemente bajo, la malla comienza a inclinarse hacia arriba para las especies (V^{2+} y VO_2^+) y hacia abajo para las especies (V^{3+} y VO^{2+}), esto es especialmente cierto a medida que aumenta la corriente. En la corriente más alta alcanzada y el flujo más bajo, la superficie alcanza un máximo para las Ilustraciones 19 y 16 y, un mínimo para la 17 y 18.

La explicación de esto es que cuando la batería se está cargando (I positiva) a una determinada corriente, el ion más cargado positivamente (V^{3+}) se reducirá por los electrones de esta corriente positiva, que lo convertirá en su homólogo del tanque, el ion más cargado negativamente (V^{2+}). Según Ilustración 10. Cuanto más bajo sea el flujo, más tiempo les costará a los iones de la celda salir. Al mismo tiempo, cuanto mayor sea la corriente, más rápida será esta reacción química de reducción. Cuando estas dos circunstancias ocurren, la consecuencia es que estos iones que se han reducido comienzan a acumularse en la celda, por lo que la inclinación hacia arriba mencionada en el párrafo anterior comienza a aparecer, mientras que por contraposición la inclinación hacia abajo sucede con los iones homólogos.

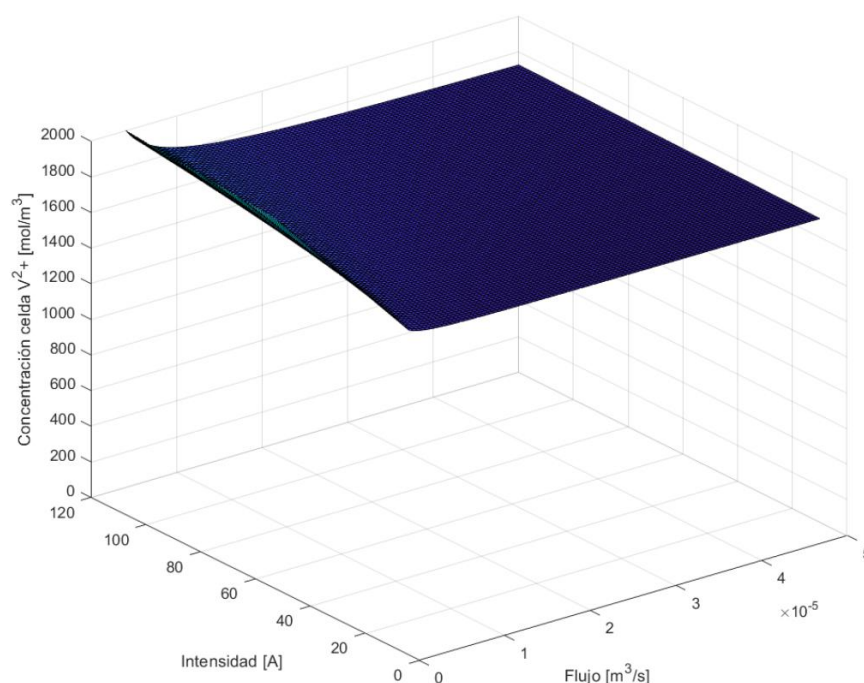


Ilustración 20. Puntos de equilibrio de V^{2+} para 85% SOC.

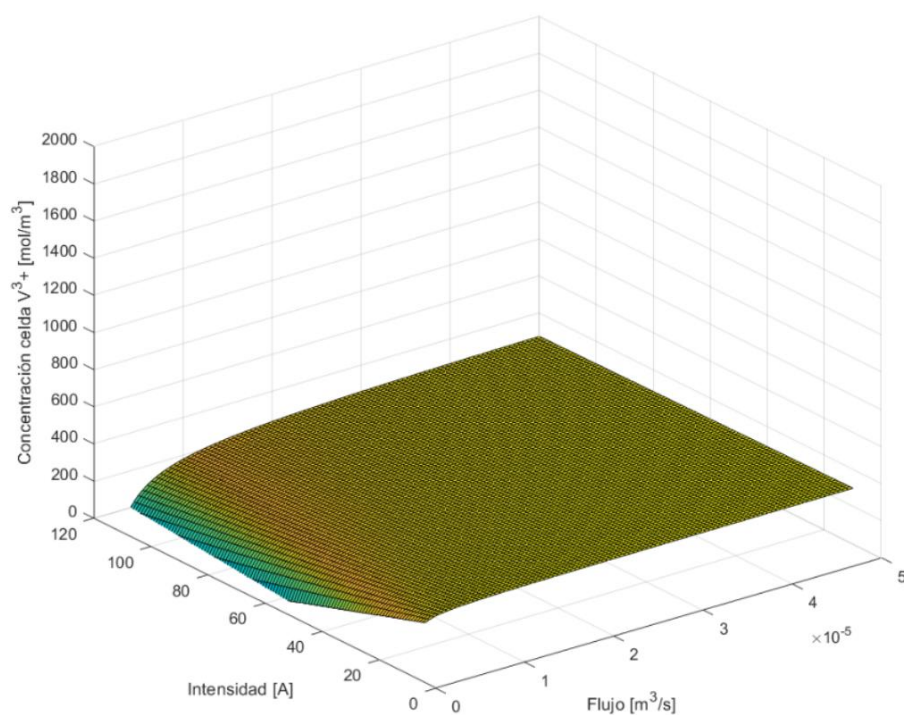


Ilustración 21. Puntos de equilibrio de V^{3+} para 85% SOC.

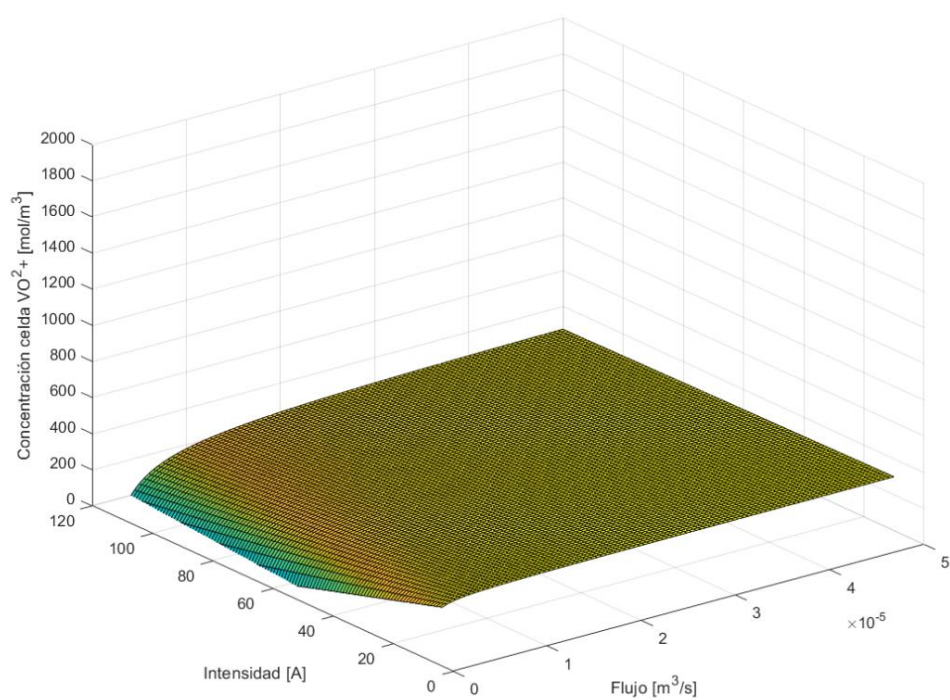


Ilustración 22. Puntos de equilibrio de VO^{2+} para 85% SOC.

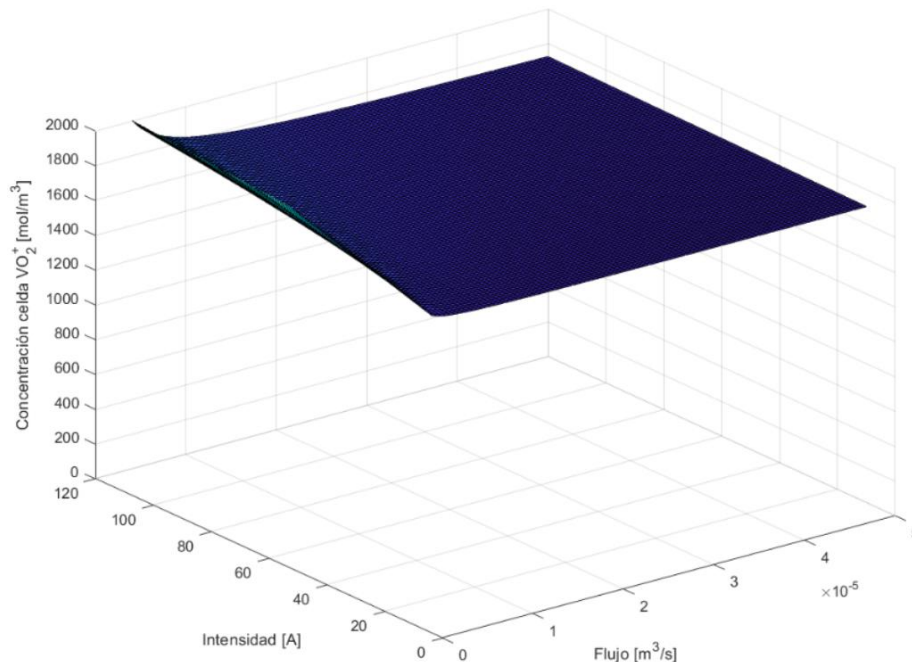


Ilustración 23. Puntos de equilibrio de VO_2^+ para 85% SOC.

Este segundo caso de estudio se ha realizado para un estado de carga del 85%, lo que quiere decir que $c_{2}^{\text{tank}} = c_{5}^{\text{tank}} = 1700 \text{ mol/m}^3$ y que $c_{3}^{\text{tank}} = c_{4}^{\text{tank}} = 300 \text{ mol/m}^3$.

Al igual que con el 15% de SOC, la malla permanece prácticamente plana para la mayoría de valores de corriente y flujo, esto ocurre para unos valores de concentración cercanos al de la concentración del tanque.

El comportamiento a flujos bajos y corrientes altas también es el mismo que antes. Esta vez es interesante observar cómo la malla se corta tanto a 0 mol/m^3 en las Ilustraciones 21 y 22, como a $c_V = 2000 \text{ mol/m}^3$ en la 20 y 23. Las ecuaciones de equilibrio producirían valores negativos o concentraciones superiores a c_V si no se establecieran límites. La explicación para esto es la misma que antes, los iones que se reducen comienzan a acumularse en la celda cuando la corriente es alta y el caudal es bajo.

3.1.6.2. Potencia de la pila de celdas

Aprovechando el haber resuelto las ecuaciones de equilibrio, se muestra a continuación la aplicación de (3.6), es decir, primero se calcula E_{stack} para poder obtener posteriormente P_{stack} que se grafica en función de la intensidad y del estado de carga, tanto para un proceso de carga como de descarga. Se fija un valor de flujo igual a $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, y el SOC varía de 0,05-0,95. También se encuentra disponible el código de MATLAB en los anexos.

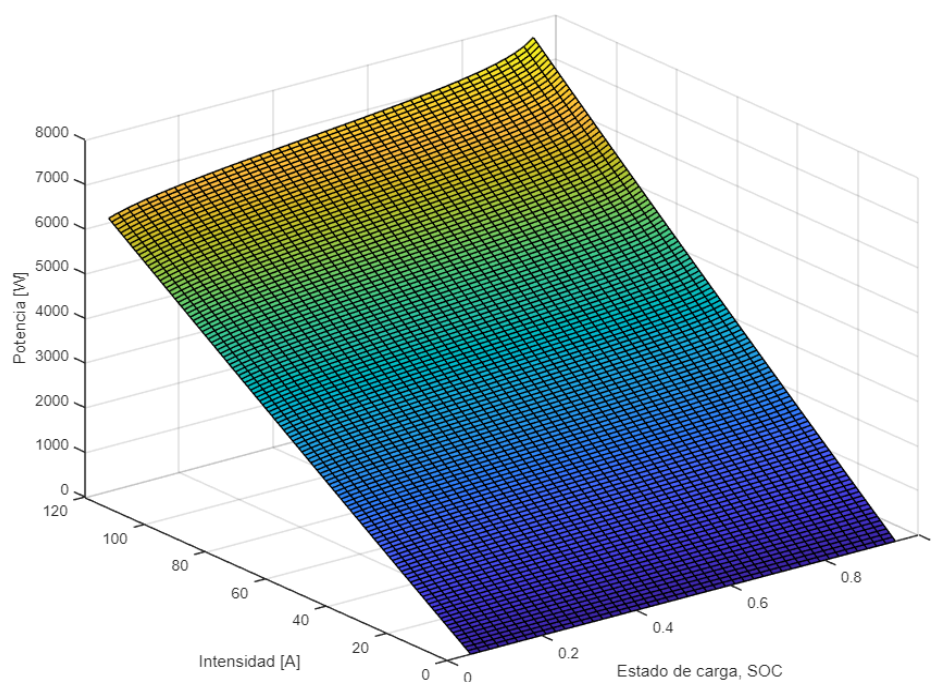


Ilustración 24. P_{stack} en función de la corriente y del SOC. Proceso de Carga.

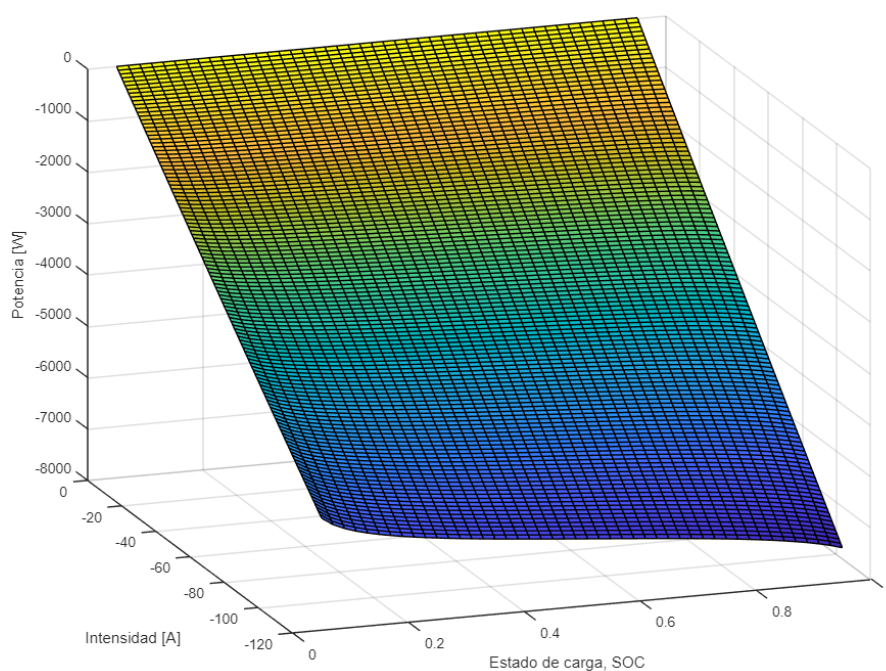


Ilustración 25. P_{stack} en función de la corriente y del SOC. Proceso de Descarga.

La potencia intercambiada con la batería P_{stack} es controlada por la intensidad I . La potencia disponible depende principalmente del estado de carga, SOC. En las dos figuras anteriores, se puede ver cómo cambia P_{stack} en función de I y del SOC, por convenio, la potencia es positiva durante la carga y negativa durante la descarga. Su valor absoluto es máximo a alto SOC y alta I . Por ejemplo, a 70 A en el proceso de carga, la potencia suministrable varía de 3535 W, cuando la batería está casi descargada, a 4395 W cuando está completamente cargada. Valores disponibles en el anexo. Obviamente, la potencia cae hasta cero sin corriente.

3.1.6.3. Flujo mínimo, Q_{min}

En este caso se observa cómo varía el valor de Q_{min} , del apartado 3.1.5. en función del SOC, de (0,05-0,95) y de la intensidad I . El código de MATLAB para dichas gráficas también se encuentra en los anexos, y se realiza para el caso de carga y descarga.

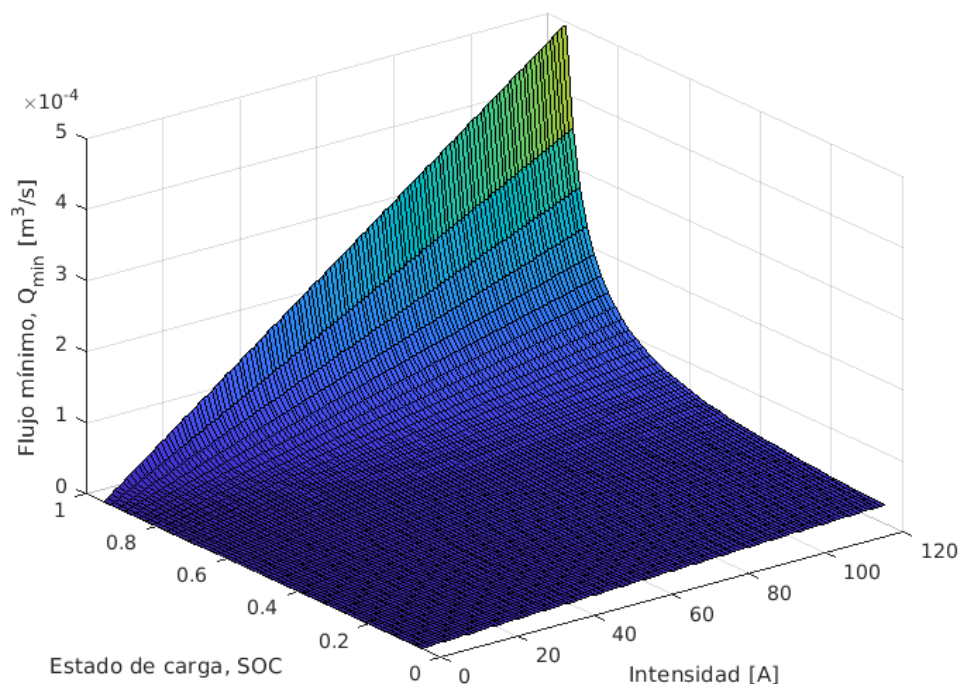


Ilustración 26. Q_{min} en función de la corriente y del SOC. Proceso de Carga.

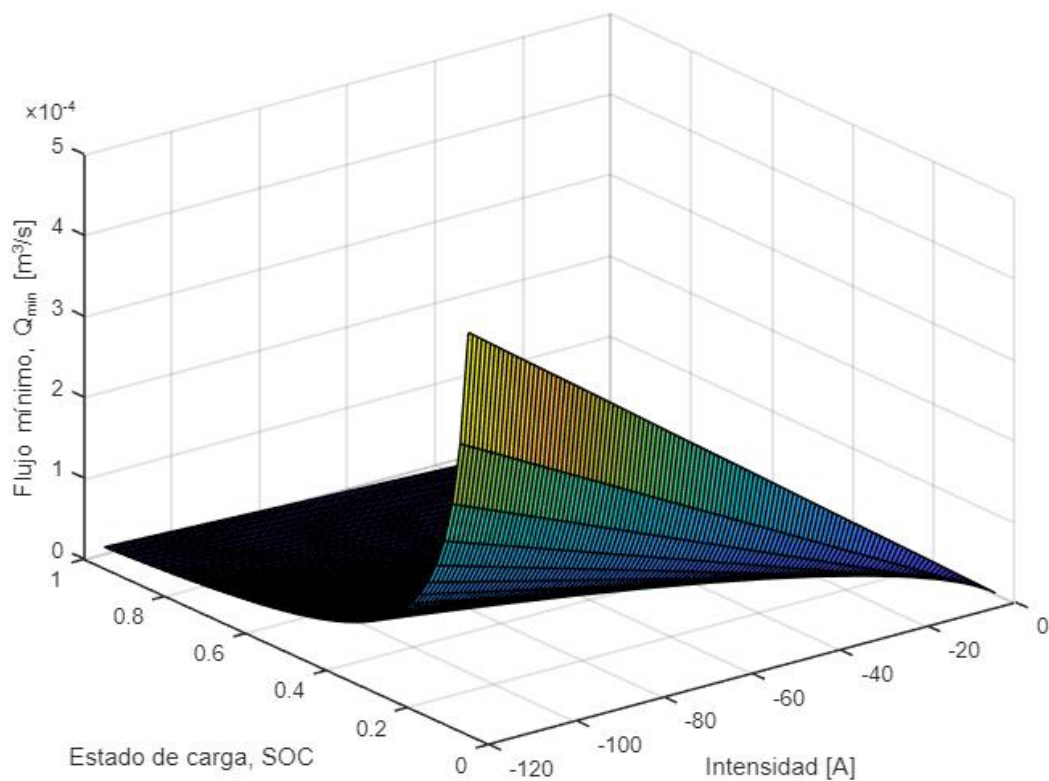


Ilustración 27. Q_{\min} en función de la corriente y del SOC. Proceso de Descarga.

El caudal mínimo Q_{\min} se ilustra en las Ilustraciones 26 y 27 para una gran cantidad de puntos de operación. Se observa que los valores máximos de Q_{\min} ocurren en las regiones críticas. Estas regiones se dan con las condiciones de alto estado de carga SOC, y alta corriente I ; durante la carga, y bajo SOC y alta intensidad; durante la descarga. Además, el flujo Q_{\min} es, en comparación, muy pequeño en todas las demás regiones operativas, por lo tanto, debe haber un gran beneficio energético en hacer funcionar la batería en Q_{\min} . Finalmente, se observa que Q_{\min} depende proporcionalmente de I y exponencialmente del SOC.

4. DIMENSIONAMIENTO DE UNA BATERÍA DE FLUJO REDOX DE VANADIO

En esta sección se muestra el estudio de un emplazamiento candidato a la implementación de un sistema de almacenamiento de energía basado en baterías de flujo de vanadio. Un hecho que como ya se ha visto, aporta numerosas ventajas en cuanto a la capacidad de almacenamiento y disponibilidad eléctrica en situaciones de difícil acceso a la red de distribución. Además, garantiza la compatibilidad e incorporación de energías renovables.

4.1. Emplazamiento

Los refugios de montaña son instalaciones aisladas en las que, debido a su ubicación y difícil accesibilidad, la gestión energética adquiere una especial relevancia en cuanto a mantener y proveer una serie de servicios mínimos de electricidad y confort térmico.

De forma tradicional, los refugios de montaña se han abastecido mediante la energía obtenida de generadores y calderas de distintos combustibles fósiles. Así pues, se propone dar un giro a esta dinámica para conseguir una propuesta técnica viable mediante el uso de paneles fotovoltaicos en sinergia con un sistema de almacenamiento de flujo de vanadio.

Para la realización del estudio se ha escogido el refugio de Lizara. Este refugio se encuentra ubicado en el Valle de Aragüés-Jasa, en el Parque Natural de Valles Occidentales, a una altitud de 1540 metros.



Ilustración 28. Refugio de Lizara. [36]

Se observa que el refugio de Lizara presenta unas características propias que permiten el aprovechamiento del recurso solar por lo que se propone estudiar mensualmente los consumos que se requieren y contrastarlos con la generación solar disponible. Finalmente introducir el uso de baterías con el fin de almacenar el excedente.

4.2. Consumos

Los consumos tanto eléctrico como térmico son un tanto característicos en este emplazamiento, por lo que se analizan por separado tal y como se muestra en las siguientes figuras.

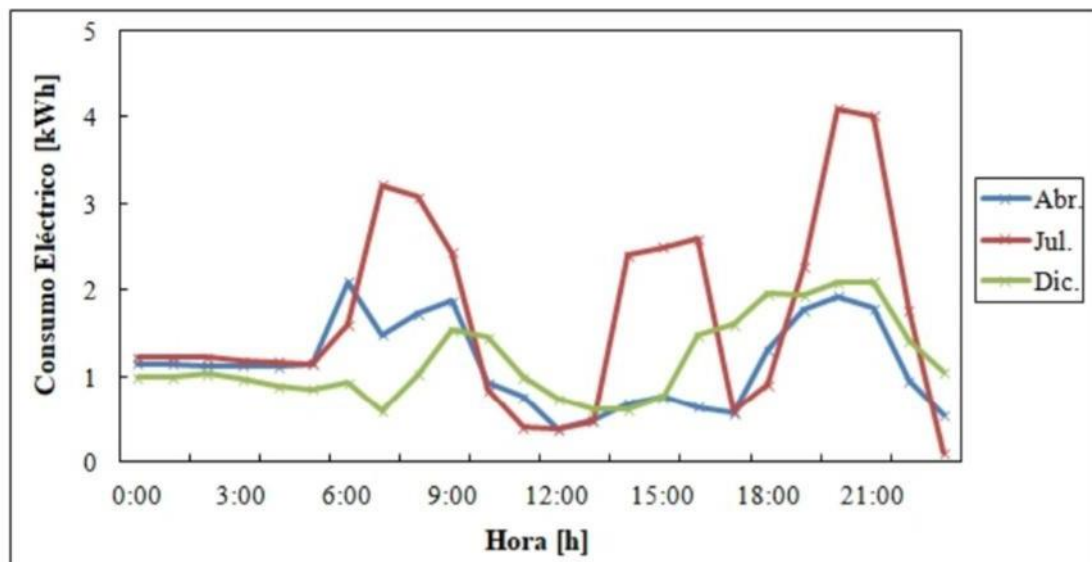


Ilustración 29. Consumo eléctrico de Lizara durante los meses de Abril, Julio y Diciembre. [37]

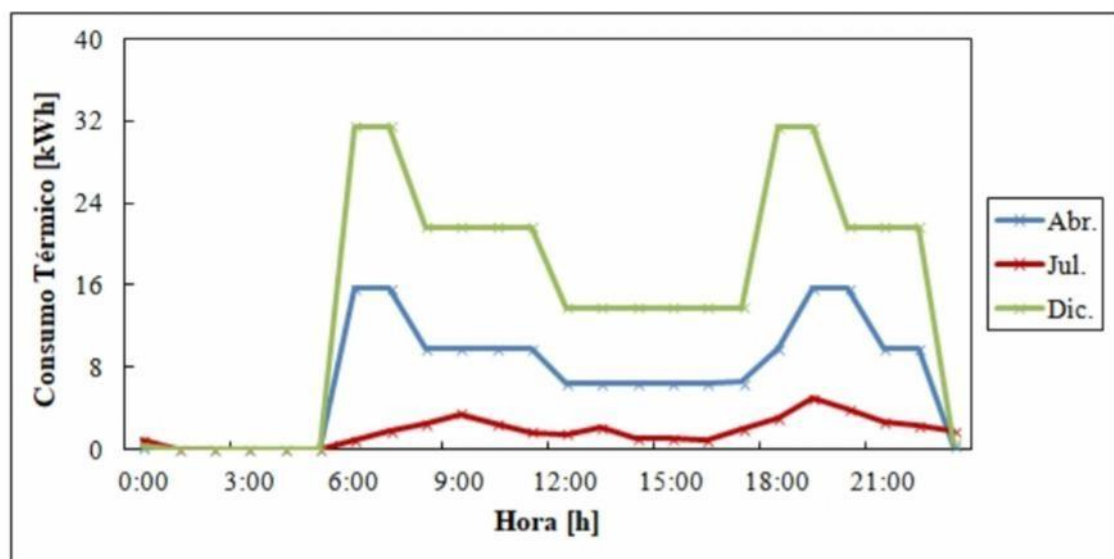


Ilustración 30. Consumo térmico de Lizara durante los meses de Abril, Julio y Diciembre. [37]

Se sabe que la variabilidad de huéspedes es muy estacional [37], concentrándose la mayor parte de ellos en verano, lo que supone un mayor consumo eléctrico durante estos meses. Además, es destacable el consumo térmico a lo largo del invierno a modo de calefacción.

Dado que sólo se dispone de datos durante tres meses del año y aprovechando que son meses muy representativos, se asumirán los consumos de los siguientes meses de esta forma:

Equivalente		Equivalente		Equivalente	
Enero		Marzo		Mayo	
Febrero	Diciembre	Setiembre	Abril	Junio	Julio
Noviembre		Octubre		Agosto	

	CONSUMO eléctrico [kWh]	CONSUMO térmico [kWh]
Enero	882	10912
Febrero	797	10560
Marzo	835	5642
Abril	809	5460
Mayo	1249	1550
Junio	1209	1500
Julio	1249	1550
Agosto	1249	1550
Septiembre	809	5460
Octubre	835	5642
Noviembre	854	10560
Diciembre	882	10912

Ilustración 31. Equivalencia consumos. Consumos eléctrico y térmico por meses.

En cuanto a las necesidades térmicas (las más destacadas y abundantes en los meses más fríos) se pretenden suplir con equipos de aerotermia de la marca Hitachi, cuyo consumo eléctrico también dependerá directamente de los paneles y batería.

Los sistemas de aerotermia son bombas de calor aire-agua de última generación diseñados para aportar refrigeración en verano, calefacción en invierno y, agua caliente todo el año. Son equipos que operan con una alta eficiencia cuando las temperaturas exteriores no son extremas.

Hasta el momento el consumo térmico de todo el edificio se provee mediante una caldera de condensación de gas propano de alrededor de 30 kW.[37] Misma potencia que se instalará con dos equipos de Yutaki S de Hitachi (aerothermia) con sus respectivos tanques dentro del refugio para la aportación de agua caliente sanitaria (ACS). La climatización del refugio se dará por suelo radiante ya que requiere una menor temperatura de impulsión que los fancoils, en concreto 35°C, y además se optimiza en aquellos espacios en los que su utilización se hace de forma continuada [38], condición que se cumple vistas las necesidades térmicas anuales del refugio.

El esquema para la climatización y producción de ACS de la vivienda es el siguiente:

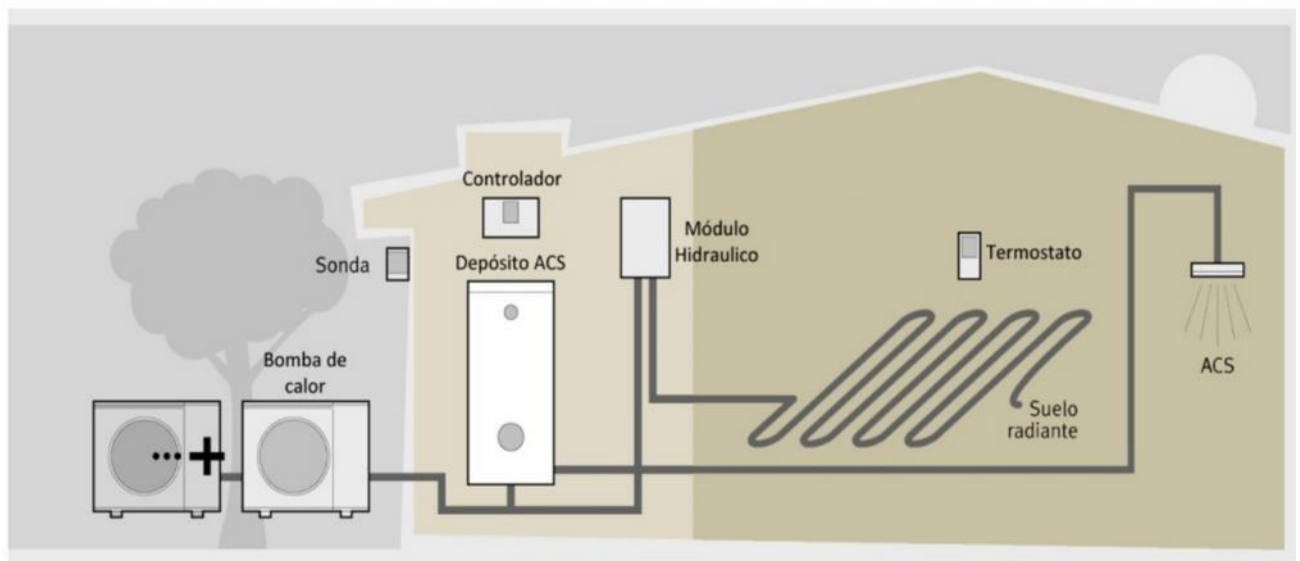


Ilustración 32. Esquema climatización y producción de ACS con Yutaki S en el refugio. [39]

De esta manera, la cantidad de energía eléctrica demandada por el refugio y que deberá ser aportada mediante los paneles solares y batería de vanadio se descompone de la siguiente manera.

Tabla 3. Desglose Consumo Eléctrico total.

Consumos del refugio		
		CONSUMO ELÉCTRICO TOTAL
+ Eléctrico		Consumo eléctrico directo del refugio
+ Térmico	Aportado con aerotermia Hitachi	Consumo eléctrico de los equipos de aerotermia

4.2.1. Consumo eléctrico aerotermia

Como se ha mencionado anteriormente, la eficiencia de los equipos de aerotermia varía en función de la temperatura exterior. Por ello se ha analizado la media de la temperatura exterior en el valle de Aragüés-Jara para que incluso en las peores condiciones, por rara vez que se den, se proporcione suficiente potencia para climatizar todo el edificio.

En el valle de Aragüés, como característica se suelen experimentar temperaturas bastante altas para la altitud a la que se sitúa, y es que es un valle muy solano que además posee una barrera montañosa que cierra el valle, y hace de divisoria climática. [40]

A pesar de este hecho, se decide dimensionar y realizar los cálculos en función de las temperaturas más desfavorables, ya que facilita el cálculo, pero resulta perjudicial en cuanto a la capacidad que ofrecen estos equipos. Es decir, el consumo eléctrico mensual de los equipos de aerotermia, realmente resultaría sutilmente inferior a lo calculado.

Para ello se hace uso de un gráfico en el que se muestran las temperaturas mínimas en Aragüés del Puerto, un pueblo situado a aproximadamente 10km del refugio y con características climáticas similares.

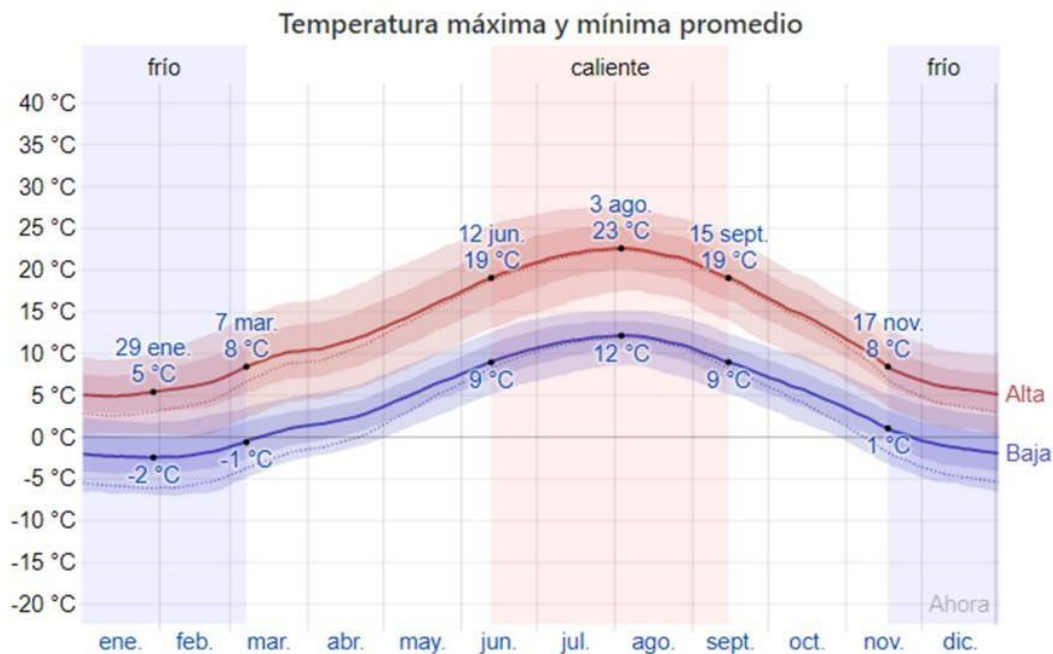


Ilustración 33. Temperaturas de Aragüés del Puerto por meses. [41]

De esta forma se ha decidido establecer una serie de temperaturas exteriores y de impulsión del agua para las cuales se calcula el SCOP mensual de los equipos de Hitachi (Yutaki S), para posteriormente obtener el consumo eléctrico de estos equipos para cada uno de los meses.

Tabla 4. Temperaturas exteriores y de impulsión del agua por meses.

	Temperatura Exterior (aire)	Temperatura de Impulsión (agua)
Enero Febrero Noviembre Diciembre	-2°C	35°C
Marzo Abril Septiembre Octubre	2°C	
Mayo Junio Julio Agosto	12°C	

Para el cálculo del SCOP se observa en el catálogo técnico de estos equipos (Yutaki S), y su comportamiento en base a la temperatura exterior mencionada y la de impulsión del agua.

4 Capacidades y datos de selección

YUTAKI S

HITACHI

Sistema	Temp. salida agua (°C)	Temperatura ambiente (°C WB)															
		-20		-15		-10		-7		-2		2		7		12	
		CAP (kW)	IPT (kW)	CAP (kW)	IPT (kW)	CAP (kW)	IPT (kW)	CAP (kW)	IPT (kW)	CAP (kW)	IPT (kW)	CAP (kW)	IPT (kW)	CAP (kW)	IPT (kW)	CAP (kW)	IPT (kW)
RAS-6WH(V)NPE + RWM-6.0NE(-W)	60	-	-	-	-	7,80	5,57	8,30	5,72	9,02	5,35	9,60	5,05	12,00	5,71	12,10	5,50
	55	-	-	-	-	10,38	7,39	12,00	7,18	12,96	7,09	13,96	7,16	17,00	7,13	17,20	6,14
	50	-	-	10,1	6,97	10,77	6,39	11,83	6,32	12,98	6,19	13,90	6,09	17,10	6,19	17,30	5,92
	45	9,00	4,86	10,32	5,34	11,63	5,81	12,50	6,13	13,56	5,68	14,48	5,36	17,30	5,33	17,50	4,49
	40	9,55	5,12	10,75	5,33	11,95	5,54	12,67	5,66	13,81	5,31	14,73	5,02	17,55	4,69	18,10	4,12
	35	10,10	5,37	11,18	5,32	12,27	5,26	13,00	5,27	14,06	4,93	15,00	4,69	17,80	4,05	18,20	3,64
	30	10,71	4,56	12,57	4,84	13,99	4,93	14,83	4,99	15,12	4,72	15,35	4,51	18,10	3,77	18,60	3,15
	25	11,30	4,48	12,83	4,63	14,02	4,64	14,73	4,65	15,18	4,47	15,54	4,33	18,50	3,78	19,90	3,37
	20	12,13	4,48	13,09	4,42	14,05	4,36	14,63	4,32	15,24	4,22	15,72	4,15	18,90	3,78	20,90	3,54

Ilustración 34. Catálogo técnico Yutaki S, de HITACHI. [42]

El SCOP para cada una de las temperaturas exteriores se obtiene dividiendo la potencia que aporta el equipo (cap), entre la potencia consumida por éste (ipt). Es destacable el hecho de que a -2°C de temperatura exterior, entre los dos equipos de Yutaki S de 6HP, que se adecuarían al estudio, no alcanzan los 30kW de potencia que actualmente tiene instalados el refugio. Sin embargo, esta temperatura se experimenta muy escasamente y la potencia obtenida en este caso difiere muy poco de la instalada, al mismo tiempo el equipo de 6HP consume menos que el inmediatamente superior y que resultaría en una instalación sobredimensionada.

Siguiendo con este procedimiento se obtienen los siguientes valores.

Tabla 5. Consumo Eléctrico aerotermia.

CONSUMO térmico[kWh]		SCOP	Consumo Eléctrico aerotermia [kWh]
Enero	10912	2,85	3826,18
Febrero	10560	2,85	3702,76
Marzo	5642	3,21	1756,54
Abril	5460	3,21	1699,88
Mayo	1550	5,00	310,00
Junio	1500	5,00	300,00
Julio	1550	5,00	310,00
Agosto	1550	5,00	310,00
Septiembre	5460	3,21	1699,88
Octubre	5642	3,21	1756,54
Noviembre	10560	2,85	3702,76
Diciembre	10912	2,85	3826,18

Finalmente, se suman los consumos eléctricos tanto de la aerotermia como los que provienen directamente del refugio, y se obtienen los consumos eléctricos totales que deberán ser suministrados.

Tabla 6. Consumo Eléctrico total.

CONSUMO ELÉCTRICO TOTAL [kWh]	
Enero	4708,13
Febrero	4499,36
Marzo	2591,99
Abril	2508,38
Mayo	1559,30
Junio	1509,00
Julio	1559,30
Agosto	1559,30
Septiembre	2508,38
Octubre	2591,99
Noviembre	4556,26
Diciembre	4708,13
	34859,53

4.3. Generación

Para la realización de este apartado se ha hecho uso del software online PVWatts Calculator, que sirve para realizar análisis fotovoltaicos de diferentes lugares del mundo.

Teniendo en cuenta la localización del emplazamiento así como el objetivo que se plantea al principio del apartado, intentar convertir el refugio en auto-sostenible con energías renovables, se han tomado una serie de decisiones al respecto.

En primer lugar, la instalación de los paneles solares se realiza en el tejado del refugio, ya que facilita el acceso a su mantenimiento, ahorra la implementación de cualquier tipo de infraestructura adicional y se dispone de una gran superficie de tejado libre para su instalación.

En concreto, se dispone de aproximadamente 316 m², tal y como se muestra en la siguiente figura.



Ilustración 35. Superficie disponible en el tejado del refugio. [43]

A partir de aquí, y sabiendo que se trata de un sistema aislado de la red, se lleva a cabo la decisión de decidir maximizar la producción de energía solar fotovoltaica en invierno, ya que es cuando mayor consumo se requiere y además, casi con total seguridad se podrá satisfacer de igual manera la demanda del refugio durante el resto de meses del año.

A partir de aquí y revisando las coordenadas en las que se encuentra el refugio, en concreto (Latitud: 42.76398° , Longitud: -0.63461°) [44], se decide la orientación de los paneles que satisfaga la condición anterior.

Dado que se instalan paneles solares fijos, se requiere establecer tanto la inclinación (elevation, en la figura) como su azimut. Cada uno de estos ángulos se refiere a lo siguiente:

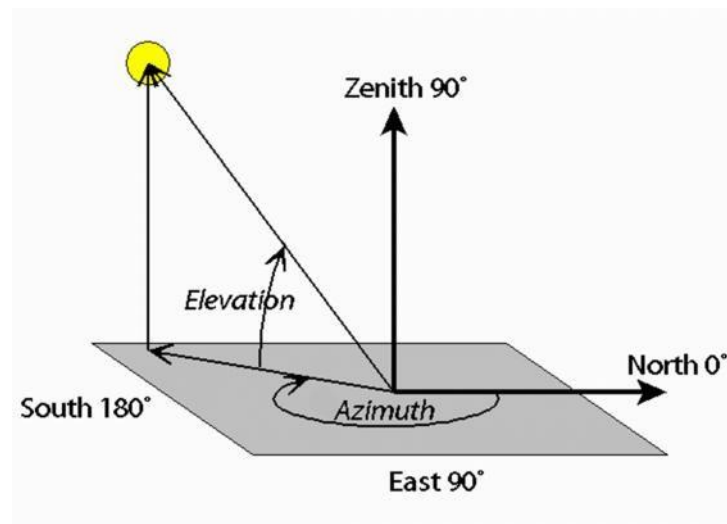


Ilustración 36. Ángulo de inclinación y azimut panel solar. [45]

Así pues, analizando el recorrido que realiza el sol en el hemisferio norte y en invierno, se decide orientar los paneles hacia el sur. Valor que en el aplicativo PVWatts equivaldría a 180° de azimut.

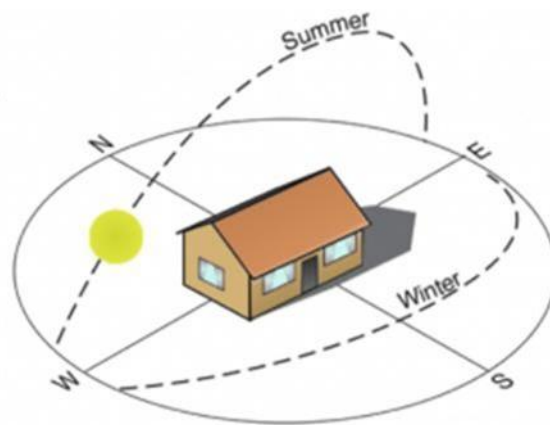


Ilustración 37. Recorrido del sol en las estaciones de verano e invierno. [46]

Llegado el momento de decidir el ángulo de inclinación para los paneles, se aprovecha el valor de Radiación Solar que muestra el aplicativo PVWatts para diferentes ángulos de inclinación y para el emplazamiento de estudio, refugio de Lizara.

De esta manera, se ha elaborado una tabla comparativa de la radiación solar para cada mes del año en función del ángulo de inclinación y siempre manteniendo constante el azimut en 180°.

Tabla 7. Valores de Radiación Solar para diferentes ángulos de inclinación. Azimut constante 180° (Sur) [47]

RADIACIÓN SOLAR [kWh/(m ² ·día)]				
Mes	Tilt (inclinación)			
	20°	40°	60°	80°
Enero	2,58	3,1	3,32	3,2
Febrero	3,93	4,57	4,75	4,43
Marzo	4,91	5,27	5,1	4,42
Abril	5,82	5,81	5,23	4,16
Mayo	6,26	5,85	4,88	3,55
Junio	6,77	6,16	4,99	3,5
Julio	7,28	6,69	5,49	3,89
Agosto	6,79	6,63	5,8	4,46
Septiembre	5,56	5,81	5,48	4,6
Octubre	4,3	4,87	4,94	4,51
Noviembre	3	3,58	3,81	3,64
Diciembre	2,47	3,07	3,36	3,29

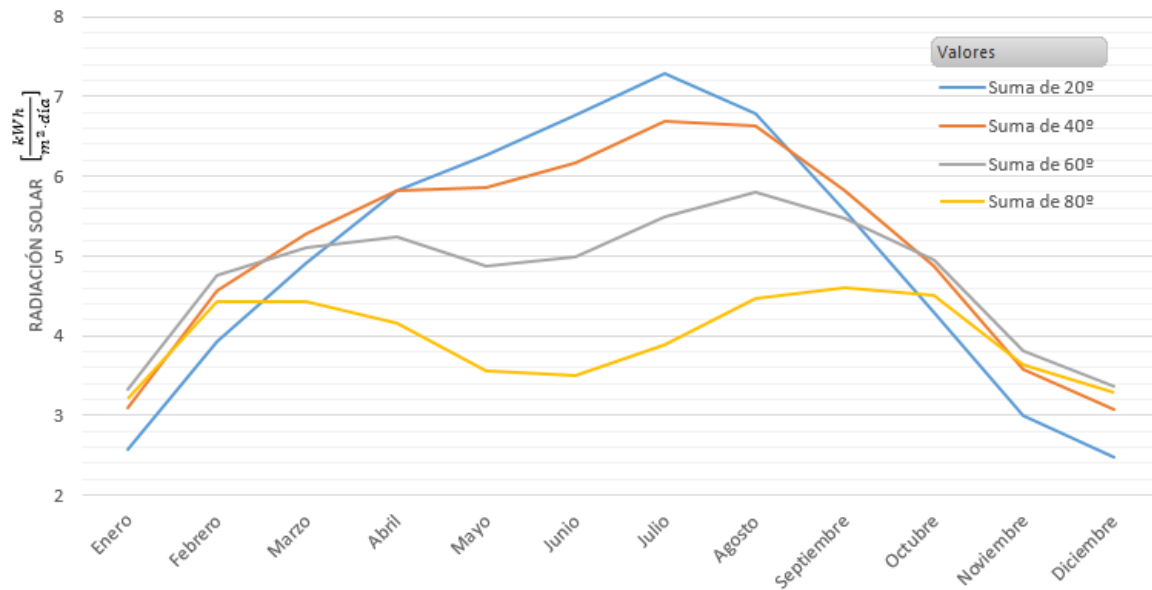


Ilustración 38. Valores de Radiación Solar para diferentes ángulos de inclinación. Azimut constante 180° (Sur) [47]

Tal y como se observa en la figura, claramente los valores de radiación solar son más elevados en los meses de invierno para el ángulo de inclinación de 60°, es decir, se podrá generar más electricidad en estos meses con dicha inclinación. Si bien es destacable, que en cuanto a la generación total anual, resulta inferior con una inclinación de 60° que con la generación derivada de un inclinación de 40°, dado que para esta última, la radiación en verano tiene unos valores bastante superiores.

Además, este ángulo de inclinación que muestra PVWatts coincide con el valor que se calcula en diferentes literaturas en las que se pretende producir más energía eléctrica en invierno según la latitud en la que se encuentra el emplazamiento. [48] [49]

A continuación se especifican algunos aspectos como el tipo de panel que se instala o las pérdidas totales del sistema.

En cuanto al tipo de panel fotovoltaico, se ha optado por el SunPower Maxeon 3 que ofrece una eficiencia del 22,6% y una potencia de 400W. [50]

Para el cálculo de las pérdidas del sistema, se realiza con ayuda del aplicativo PVWatts que permite el desglose de éstas, estableciendo su correspondiente ponderación. Para este caso del refugio situado en una zona aislada de vegetación y lugar clareado y con escasas nieves, resultan en un valor aproximado del 11%. Se emplea la siguiente fórmula para las pérdidas.

$$\begin{aligned}
 \text{Losses} = 100 * [1 - (1 - \%soiling) * (1 - \%snow) * (1 - \%mismatch) * (1 - \%wiring) \\
 * (1 - \%connections) * (1 - \%degradation) * (1 - \%nameplate_rating) \\
 * (1 - \%availability)] = 10.95 \%
 \end{aligned}$$

Calculate System Losses Breakdown

Modify the parameters below to change the overall System Losses percentage for your system.

Soiling (%):	<input type="text" value="2"/>	<div style="border: 1px solid #ccc; padding: 10px; background-color: #f0f0f0;"> <p>Estimated System Losses:</p> <p style="font-size: 2em; color: #0070C0; margin: 0;">10.95%</p> </div>
Shading (%):	<input type="text" value="0"/>	
Snow (%):	<input type="text" value="1"/>	
Mismatch (%):	<input type="text" value="2"/>	
Wiring (%):	<input type="text" value="1.5"/>	
Connections (%):	<input type="text" value="0.5"/>	
Light-Induced Degradation (%):	<input type="text" value="1.5"/>	
Nameplate Rating (%):	<input type="text" value="1"/>	
Age (%):	<input type="text" value="0"/>	
Availability (%):	<input type="text" value="2"/>	

Ilustración 39. Cálculo de las pérdidas del sistema. [51]

De esta forma, teniendo en cuenta las pérdidas del sistema, el rendimiento del tipo de panel fotovoltaico, las diferentes características de su instalación y, por consiguiente la radiación solar posiblemente captada en el refugio de Lizara, se estima los siguientes valores de energía generada por mes. Todo esto asumiendo una superficie cubierta por paneles solares de 110 m².

Tabla 8. Energía total generada.

ENERGÍA ELÉCTRICA TOTAL GENERADA [kWh]	
Enero	2277,15
Febrero	2942,68
Marzo	3498,03
Abril	3471,48
Mayo	3347,13
Junio	3312,17
Julio	3765,52
Agosto	3978,15
Septiembre	3637,42
Octubre	3388,28
Noviembre	2528,93
Diciembre	2304,58
	38451,51

A continuación se muestra un sencillo esquema de la instalación requerida para llevar a cabo el estudio. En él se muestran los paneles solares junto al principal componente, la batería y un inversor que permite abastecer los consumos en corriente alterna. Finalmente el regulador que aparte de proteger la batería, controla el estado de carga de ésta.

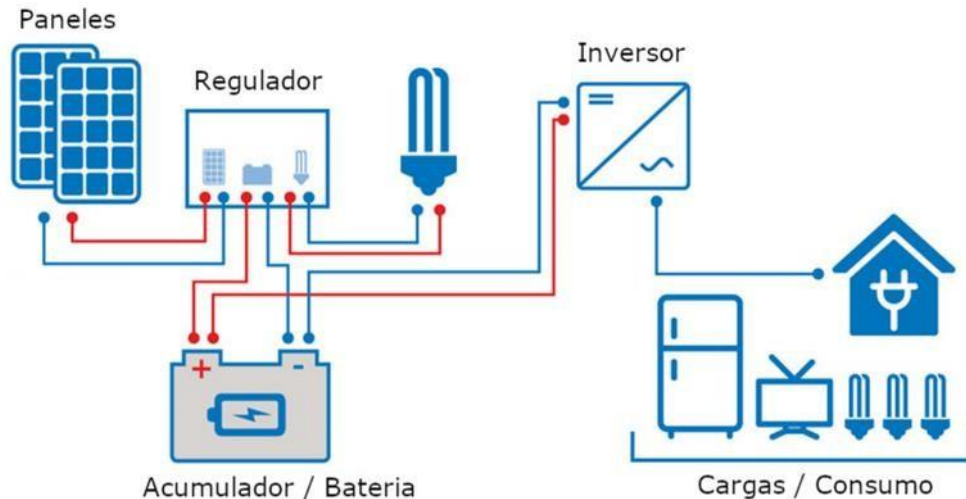


Ilustración 40. Instalación fotovoltaica aislada. [52]

4.4. Cálculos y ecuaciones de la batería

Llegados a este punto y conociendo los consumos mensuales del refugio así como la generación fotovoltaica que producen los paneles en este emplazamiento, es necesario calcular el tamaño de los tanques de la batería de flujo de vanadio. Una batería, que a ser posible debe almacenar el excedente producido durante los meses de mayor sol, es decir, de mayor generación fotovoltaica y poder aprovecharlo durante los meses de mayor consumo. En la medida de lo posible la batería debería permitir al refugio ser auto-sostenible sustentándose con energía renovable, un objetivo muy ambicioso debido a los duros meses de invierno donde el consumo térmico es altamente elevado.

Tal y como se ha visto en puntos anteriores, uno de los aspectos más importantes de las baterías de flujo de vanadio y que es el principal responsable de la capacidad de ésta es el dimensionamiento de los tanques.

Para la realización estos cálculos acerca de los tanques, se han empleado las siguientes ecuaciones.

$$\mathbf{STACK\ ENERGY\ (kWh)} = \mathbf{StackPower\ (kW)} * \mathbf{Storage_time\ (h)} \quad (4.1)$$

Ecuación a partir de la cual se obtiene la cantidad de energía que va a ser capaz de almacenar la batería. El primer término de esta ecuación se calcula de la siguiente manera:

$$\mathbf{StackPower\ (kW)} = \mathbf{Mean_power_density\ (\frac{W}{cm^2 * cells})} * \mathbf{n^2cells} * \mathbf{electrode_area(cm^2)} \quad (4.2)$$

Y finalmente se muestra cómo obtener la densidad de potencia media de cada celda.

$$\mathbf{Mean_power_density\ (\frac{W}{cm^2 * cells})} = \mathbf{Current_density\ (\frac{A}{cm^2})} * \mathbf{V_{cell}\ (V)} \quad (4.3)$$

Otro de los valores sumamente importantes es el volumen de uno de los dos tanques que componen la batería y se calcula en base al valor obtenido en la ecuación 4.1.

$$\mathbf{TANK\ VOLUME\ (L)} = \frac{\mathbf{Stack\ Energy\ (kWh)} * \mathbf{1000}}{\mathbf{Energy_density\ (\frac{Ws}{L})} * \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{3600}}} \quad (4.4)$$

El otro valor que requiere ser calculado es la densidad de energía.

$$\mathbf{Energy_density\ (\frac{Ws}{L})} = \mathbf{V_{cell}\ (V)} * \mathbf{Charge_density\ (\frac{C}{L})} \quad (4.5)$$

Finalmente, la densidad de carga se obtiene de la siguiente manera, donde se aprecia la influencia de los límites del SOC. En resumidas cuentas, se deja entrever que si se desea alcanzar valores de SOC muy bajos, en esas condiciones los rendimientos son muy reducidos porque habría que impulsar mucho volumen de disolución y aun así un bajo porcentaje de lo impulsado realmente estaría contribuyendo a alimentar eléctricamente una carga o a cargar la batería.

$$\mathbf{Charge_density\ (\frac{C}{L})} = \mathbf{Faraday_{constant} * Reagent_{limitant}concentration} * \frac{\mathbf{SOC_M + SOC_m}}{\mathbf{2}} \quad (4.6)$$

En la siguiente tabla se exponen los parámetros y constantes que aparecen en las ecuaciones anteriores junto con sus valores y unidades. Éstos han sido utilizados para obtener los resultados que se interpretan a continuación.

Tabla 9. Parámetros dimensionamiento y sus valores.

Parámetro	Valor	Unidades
Nº cells	40	-
Electrode area	600	cm ²
Current density	0,12	A/cm ²
SOC Range	0,95 – 0,45	-
Vcell	1,25	V
Faraday _{constant}	96485,333	C/mol
Concentración React. Limitante (V ₂)	2	mol/L
Storage time	3*30*24 (3meses)	h

Implementando todos estos valores y resolviendo las ecuaciones 4.1-4.6 se logra dimensionar una batería de las siguientes características.

Tabla 10. Características dimensionamiento batería.

Stack Energy	7776,00 kWh
Stack Mean Power	3,60 kW
Mean power density	0,15 W/(cm ² ·cell)
TANK VOLUME	165790 L
Energy density	168849,33 Ws/L
Charge density	135079,47 C/L

El valor que más limita y que era una de las principales desventajas de esta tecnología es el gran tamaño de los tanques. En este caso resultan de 165800 litros cada uno de ellos, es decir, 165.8 m³.

Otra manera de hacerse una idea del tamaño del tanque es calculando el equivalente en contenedores de carga, como los de la figura siguiente.



Ilustración 41. Contenedor de transporte de mercancías. Dimensiones 2,34·2,29·5,9 m³ [53]

Y en este caso resulta cada tanque en alrededor de 5 contenedores de este tipo. A pesar de esta gran desventaja, cabe recordar que el valor del tamaño de los tanques es meramente un indicador de la capacidad que puede albergar dicha batería. En este caso se pretendía almacenar el equivalente al consumo de los meses de invierno, es decir, es totalmente razonable el valor obtenido. Además, nótese que el tamaño del tanque sólo afecta a la duración del ciclo de carga-descarga y no al rendimiento de la batería.

Para analizar el segundo aspecto más importante, la cantidad de energía almacenada, y ver cómo de cerca se está de lograr el objetivo inicial, es necesario comparar mes a mes los consumos requeridos y la cantidad de energía eléctrica generada mediante los paneles fotovoltaicos. Dicho de otra manera, los valores de la Tabla 8 – Tabla 6.

Tabla 11. Energía eléctrica generada - energía eléctrica consumida.

	Energía eléctrica generada - Energía eléctrica consumida [kWh]
Enero	-2.430,99
Febrero	-1.556,68
Marzo	906,03
Abril	963,10
Mayo	1.787,83
Junio	1.803,17
Julio	2.206,22
Agosto	2.418,85
Septiembre	1.129,04
Octubre	796,29
Noviembre	-2.027,33
Diciembre	-2.403,55
	3.591,98

En la tabla anterior se han marcado en azul aquellos meses en los que la generación eléctrica es superior al consumo, pues existe un excedente durante ese periodo que puede ser almacenado. Ahora bien, si se suma todo el déficit de energía eléctrica que aparece entre los meses de noviembre a febrero, se alcanza una cifra de -8.418,55 kWh.

Es evidente que aunque en octubre se cargue la batería de vanadio hasta su capacidad máxima, ésta no es capaz de abastecer el refugio en los meses de mayor demanda. No obstante, con los 7.776,00 kWh de capacidad que posee la batería, no estaría tan lejos del objetivo, dando abastecimiento a todos los meses de déficit, excepto a aproximadamente la

mitad de Febrero.

4.4.1. Medidas adicionales

Debido al actual y suficientemente elevado tamaño de los tanques, se decide realizar algún cambio en la generación para así exponer un análisis en el cual, efectivamente se logra obtener un refugio aislado de la red y auto-sostenible mediante energías renovables.

Para ello se decide elevar la superficie cubierta de paneles solares de 110 a 120 m². Con lo que se consigue reducir el déficit de los meses de Noviembre a Febrero, de -8.418,55 a -7.504,61 kWh con lo que ahora, la capacidad de la batería resulta suficiente para autoabastecer al refugio en los meses de mayor consumo.

Tabla 12. Energía eléctrica generada - energía eléctrica consumida. Vers2

	Energía eléctrica generada - Energía eléctrica consumida [kWh]
Enero	-2.223,98
Febrero	-1.289,17
Marzo	1.224,04
Abril	1.278,68
Mayo	2.092,12
Junio	2.104,28
Julio	2.548,54
Agosto	2.780,50
Septiembre	1.459,71
Octubre	1.104,32
Noviembre	-1.797,42
Diciembre	-2.194,05
	7.087,57

Es cierto que, con la medida implementada, aún se incrementa más el excedente de energía disponible para almacenar durante el periodo de Marzo a Octubre, es decir, los meses que aparecen en azul.

Actualmente, la suma de todo el periodo azul alcanza una cifra de casi el doble de la capacidad de la batería, dicho de otra manera, en Julio ya se conseguiría cargar la batería hasta el valor máximo de SOC establecido.

Así pues se plantean dos posibles implementaciones en el refugio que permitirían aprovechar esta generación sobrante a pesar de la inversión económica que requerirían.

- Bombear agua a un pantano que se encuentre a mayor altura y generar energía hidroeléctrica en los meses requeridos. Debido a las características climatológicas del emplazamiento, únicamente dos meses al año la producción hidroeléctrica es nula. [37]
- Implementar una instalación que permita al refugio estar conectado a la red eléctrica en todo momento. De esta manera, una vez se ha cargado la batería, se puede proceder a vender el excedente al mercado eléctrico.

5. VIABILIDAD ECONÓMICA

En este apartado se desea realizar un estudio simbólico de viabilidad económica en base a los cálculos obtenidos en el apartado 4.0, donde se dimensiona una batería de flujo de vanadio con el ambicioso objetivo de convertir al refugio de Lizara en un emplazamiento auto-sostenible mediante energías renovables en conjunto con una batería de flujo de vanadio.

El resultado del dimensionamiento de la batería, ha demostrado el gran potencial de esta tecnología de almacenamiento, sin embargo, se han obtenido unos valores extremadamente altos en cuanto a capacidad y volumen de los tanques. Es por ello que en el análisis económico, ya que se va a estar trabajando con unos números muy elevados se ha decidido contemplar únicamente aquellos gastos que son sustanciales.

Esta decisión es visible en el cálculo del coste aproximado de la batería, teniendo únicamente en cuenta los componentes más importantes de ésta [54].

En la siguiente tabla se muestran los cálculos que incluyen los componentes más importantes de la inversión del dimensionamiento de la solución energética del refugio.

Tabla 13. Inversión Inicial

INVERSIÓN INICIAL			
Batería	3,6 kW 7776 kWh		
	Cantidad requerida	Coste por unidad	Total
V ₂ O ₅ energy density	6,0 kg/kWh		
Bipolar plates		65 €/kW	234
Flow frames, etc		435 €/kW	1566
Separator	2,1 m ² /kW	25 €/m ²	189
V ₂ O ₅	46656 kg	13,6 €/kg	634521,6
Tanks	2x165800 L	0,038 €/L	12600,8
Pumps	2	160 €	160
Total			€ 649.271,40

Instalación Fotovoltaica	120 m ² 1,76774 m ² /panel
--------------------------	---

	Cantidad requerida	Coste por unidad	Total
Paneles	68 ud	310 €/ud	21044
Inversor + regulador	1 ud	1500 €/ud _{aprox}	1500
Total			€ 22.543,82

Aeroterminia	Yutaki-6HP
--------------	------------

	Cantidad requerida	Coste por unidad	Total
Unidad interior	2 ud	2116 €/ud	4232
Unidad exterior	2 ud	2608 €/ud	5216
Tanque ACS	2 ud	1191 €/ud	2382
Total			€ 11.830,00

TOTAL		€ 683.645,22
-------	--	--------------

A continuación, a modo de cantidad ahorrada anualmente, se muestran los gastos que sin implementar ningún tipo de solución energética estaría consumiendo el refugio cada año [37]. Nótese, que se ha añadido la parte de generación anual fotovoltaica que poseen a modo de consumo diésel, ya que el dimensionamiento de los paneles solares se realizó suponiendo que no existía ninguna instalación de este tipo previa.

Tabla 14. Ahorro anual

AHORRO ANUAL

Generador diésel

	Cantidad requerida	Coste por unidad	Total
Diésel	6001 L/año	1 €/L	6001
Act. Fotovoltaica (diésel)	2500 L/año	1 €/L	2500
Total			€ 8.501,00

Caldera Propano			
	Cantidad requerida	Coste por unidad	Total
Gas propano	6568 kg/año	2 €/kg	13136
Total			€ 13.136,00

Madera			
	Cantidad requerida	Coste por unidad	Total
Madera	2 m ³	100 €/m ³	200
Total			€ 200,00

Transporte			
Total			€ 2.000,00

TOTAL		€ 23.837,00
-------	--	-------------

Si se calcula el periodo de retorno para esta inversión, y desestimando los gastos de mantenimiento de la instalación, resulta en casi 29 años. Un valor claramente elevado para un emplazamiento como el que ocupa este trabajo.

Es evidente pues, que no resulta viable económicamente la implementación en el refugio de Lizara del diseño estudiado y dimensionado que se muestra en el apartado 4.0. Sin embargo, sabiendo el gran consumo que exige este emplazamiento, el reconducir este dimensionamiento hacia una solución energéticamente rentable pasa por apostar por la combinación de la actual solución junto con el soporte de combustibles fósiles. Es decir, se ha probado las grandes ventajas de esta tecnología de almacenamiento, que en algunos casos, como en los meses de más demanda energética, se podría combinar con generadores diésel que permitirían reducir en gran medida tanto el tamaño de los tanques como la capacidad de almacenamiento, todo esto acompañado por una gran reducción de los costes de inversión.

6. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

El alcance de este proyecto es puramente teórico. Se propone modelizar y analizar el comportamiento de un sistema hipotético que podría construirse en la vida real y, por lo tanto, prácticamente no se han utilizado recursos para desarrollarlo.

Por otro lado, es evidente, que las baterías de flujo redox en el mundo real tienen un notorio impacto ambiental. Si bien, su propósito es principalmente ayudar en la transición hacia energías renovables dejando atrás aquellas no-limpias.

A día de hoy ya es un hecho, que estas baterías ofrecen una mejor solución frente a baterías de litio debido a su extraordinaria larga vida útil y al hecho de que el vanadio es una sustancia química inocua y no se deteriora, especialmente en comparación con los combustibles fósiles. Además permite ser reciclado al finalizar la vida útil de las baterías.

Una de las principales características de las VRFBs es que son considerablemente grandes en comparación con otras formas de almacenamiento de energía. Por lo tanto, en aplicaciones a gran escala, podrían afectar paisajes o necesitar varios recursos para construirlos. Sin embargo, las ventajas parecen ser mucho más numerosas y mayores que las desventajas en lo que respecta al impacto ambiental.

También es preciso considerar cualquier potencial derrame de los tanques ya que se maneja el electrolito en una disolución con ácido sulfúrico. Además de la posibilidad de formación de gas hidrógeno que en caso de una instalación en interior, obligaría a disponer de una correcta ventilación.

En términos generales, el uso de VRFBs podría significar un gran paso adelante para la adquisición e incorporación de energías renovables y, finalmente, tener un impacto positivo en el bienestar del planeta.

CONCLUSIONES

Partiendo desde una perspectiva más detallada, y prestando atención a las desventajas, ha quedado relatado cómo una cantidad considerable de tanto celdas como pilas de celdas en serie, dan lugar a corrientes de derivación, que se traduce en pérdidas. Y es por eso que una cadena de pilas será siempre menos eficiente que una sola pila. Queda evidenciado pues, que para mejorar la eficiencia energética se debe realizar un trabajo fundamental para estudiar los mecanismos actuales de corrientes de derivación para encontrar soluciones de diseño que reduzcan sus efectos negativos.

En cuanto al flujo mínimo, después de analizarlo analítica y gráficamente en función del estado de carga e intensidad, queda probado que si se escoge un intervalo acotado de funcionamiento del SOC, se logra operar a un flujo mínimo Q_{min} , de valores relativamente bajos que permite obtener grandes beneficios energéticos.

Del punto de dimensionamiento de la batería ha quedado reflejado el gran potencial y variedad de soluciones que ofrecen este tipo de baterías. Sin embargo, el cálculo de rentabilidad deja entrever que a pesar de esa viabilidad técnica, aún son necesarios grandes avances tecnológicos para poder ofrecer una alternativa con VRFB en combinación con energías renovables que garantice una viabilidad económica y que sustituya al completo las soluciones actuales que dependen de combustibles fósiles.

A fin de cuentas, las baterías de flujo redox poseen propiedades únicas que las hacen excelentes en aspectos con los que las baterías convencionales no pueden competir, especialmente trabajando en aplicaciones a gran escala. Con más esfuerzos en el desarrollo de la tecnología y su implementación en la vida real, las VRFBs pueden ser la clave para un futuro impulsado por energía renovable.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a Ramon Costa Castelló el interés mostrado sobre el tema, las cosas que me ha enseñado, y sobre todo por la paciencia, disponibilidad y ganas de aprender sobre las baterías de flujo de vanadio y todo lo que estas conllevan.

Adicionalmente me gustaría hacer una pequeña mención a los ingenieros de prescripción de Hitachi Barcelona, por la colaboración prestada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Barote L, Marinescu C. C, Georgescu M, *Modelado VRB para almacenamiento en sistemas de energía eólica independientes*, en IEEE Bucharest Power Tech Conference.
- [2] Hwang, J., Myung, S. and Sun, Y. (2017). *Sodium-ion batteries: present and future*. *Chemical Society Reviews*, vol. 46(N 12), pp.3529-3614
- [3] Alfred Rufer. *Energy Storage, Systems and components* [en línea]. Taylor and Francis Group, 2018. ISBN 9781138082625. [consulta: ...]. <ftp://www.energia.bme.hu/pub/_energy_stroge/Alfred%20Rufer%20-%20Energy%20Storage_%20Systems%20and%20Components%20(2018,%20CRC%20Press).pdf >
- [4] *Electropaedia*. [en línea] Chester, Reino Unido. Disponible en < www.mpoweruk.com>
- [5] Guacaneme, J., Velasco, D. and Trujillo, C. (2013). *Revisión de las Características de Sistemas de Almacenamiento de Energía para Aplicaciones de Micro Redes*.
- [6] Romero Paredes, H., Ambriz García, J., Espinosa Paredes, G. and Fernández Madrigal, A. (2010). *Almacenamiento de la Energía*.
- [7] *Energy Storage Association*. [en línea] Washington, 2019. *Disponible en* <<https://energystorage.org/>>
- [8] Haisheng, C., Thang Ngoc, C., Wei, Y., Chunqing, T., Yongliang, L. and Yulong, D. (2008). *Progress in electrical energy storage system: A critical review*. Elsevier, 19, pp.291-312
- [9] 2019 *MAXWELL TECHNOLOGIES, INC* [en línea]. Disponible en <<https://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/>>
- [10] GIA (n.d.) *Almacenamiento: Estado de las tecnologías. Resumen ejecutivo*.
- [11] M. Patel, *Spacecraft power systems*. 2005.
- [12] Mahammad, A., Hoque, M., Yusof, Y. and Ker, P. (2018). *State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations*. IEEE.H

- [13] DC. Rydh, “*Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationnary energy storage*,” Journal of Power Sources, vol. 80, 1999.
- [14] D. Linden and T. Reddy, *Handbook of batteries*. 2002. ISBN 0-07-135978-8
- [15] Shigematsu T. *Redox flow batteries for energy storage*. SEI Technical Review. 2011; num. 73
- [16] Gandomi, Y., Aaron, D., Houser, J., Daugherty, M., Clement, J., Pezeshki, A., Ertugrul, T., Moseley, D. and Mench, M. (2018). *Critical Review—Experimental Diagnostics and Material Characterization Techniques Used on Redox Flow Batteries*. Journal of The Electrochemical Society, 165.
- [17] EASE - European Associaton for Storage of Energy. *Electrochemical Energy Storage*
- [18] Nanalyze. *Prudent Energy’s Vanadium Flow Battery*. 2014 [en línea]. Disponible en <<https://www.nanalyze.com/2014/11/prudent-energys-vanadium-flow-battery/>>
- [19] Ana Barbón Núñez. *Análisis de ventajas e inconvenientes de las baterías de flujo redox frente a las baterías de iones de litio*. Trabajo de final de Máster. Área de ingeniería eléctrica, electrónica de computadores y sistemas. [en línea] Disponible en <<http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/48646/3/TFMAnaBarbonRUO.pdf>>
- [20] T. Nguyen, R. F. Savinell. *Flow Batteries*. 2010 p.54-56
- [21] IRENA (2017). *Electricity Storage and Renewables, Cost and Markets to 2030*
- [22] Twenergy (n.d.). *Guía sobre el sector del almacenamiento de energía a media y gran escala*.
- [23] C. Doetsch J. Burfeind. *Chapter 12 Vanadium Redox Flow Batteries*. 2016
- [24] S. Kim. *Vanadium Redox Flow Batteries: Electrochemical Engineering*. 2019
- [25] Binyu X. Jiyun Z. Jinbin L. *Modeling of an all-vanadium redox flow battery and optimization of flow rates*. 2013.
- [26] C. Blanc. *Modeling of a Vanadium Redox Flow Battery Electricity Storage System*. Tesis Doctoral nº 4277. 2009.
- [27] RITCHIE, I.M. SIIRA, O.T. *Redox batteries- an overview, 8th Biennial Congress of the International Solar Energy Society Proceedings*, 1983

- [28] A. Tang, J. McCann, J. Bao, M. Skyllas. *Investigation of the effect of shunt current on battery efficiency and stack temperature in vanadium redox flow battery*. 2013.
- [29] W. Xiao, L. Tan. *Control strategy optimization of electrolyte flow rate for all vanadium redox flow battery with consideration of pump*. 2019.
- [30] F. Xing, H. Zhang, X. Ma. *Shunt current loss of the vanadium redox flow battery*. 2011.
- [31] ONTIVEROS, L.J. MERCADO, P.E. *Modeling of a Vanadium Redox Flow Battery for power system dynamic studies*, Elsevier, 2013.
- [32] C. Yin, S. Guo, H. Fang, J. Liu, Y. Li, H. Tang. *Numerical and experimental studies of stack shunt current for vanadium redox flow battery*. 2015.
- [33] T. Leibfried, J. Tübke. *Model-based Design and Optimization of Vanadium Redox Flow Batteries*. Dissertation. 2017.
- [34] A. Tang, J. Bao, M. Skyllas-Kazacos. *Studies on pressure losses and flow rate optimization in vanadium redox flow battery*. 2014.
- [35] GAGNIUC, A. P. *Markov Chains: From Theory to Implementation and Experimentation*, John Wiley & Sons, 2017.
- [36] Stadium Casablanca. 2019 [en línea] Disponible en: <<https://stadiumcasablanca.com/raquetas-de-nieve-gr11-sarrios-desde-lizara/>>
- [37] M. Gutiérrez Roa. Análisis y optimización energética del refugio de montaña de Lizara mediante energías renovables. [en línea] Disponible en: <<http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2018/CT%202018/22224313.pdf>>
- [38] Calor y Frío. Suelo radiante: Ventajas e inconvenientes. [en línea] Disponible en: <<https://blog.caloryfrio.com/suelo-radiante-ventajas-e-inconvenientes/>>
- [39] Airzone. Aerotermia: qué es y qué ventajas y desventajas presenta. [en línea] Disponible en: <http://www.airzone.es/blog/climatizacion/aerotermia-que-es-que-ventajas-tiene/?_sm_au_=iVVMZMQD2Q6SQSFjkpQ8jKtB7ckcW>
- [40] Clima y nieve Pirineos. El clima de la canal de Berdún y los valles de Ansó, hecho y Aragüés. [en línea] Disponible en: <<http://www.climaynievepirineos.com/c/c6/c6.htm>>
- [41] Weatherspark. El clima promedio en Aragüés del Puerto. [en línea] Disponible en: <<https://es.weatherspark.com/y/43252/Clima-promedio-en-Arag%C3%BC%C3%A9s->>

del-Puerto-Espa%C3%B1a-durante-todo-el-
a%C3%B1o?_sm_au_=iVVSt4H225hkmNqkpQ8jKtB7ckcW>

- [42] Hitachi. Catálogo técnico Aerotermia Yutaki. [en línea]. Disponible en: <<https://www.hitachiircon.es/recursos/aerotermia/otros/catalogo-tecnico-aerotermia-yutaki>>
- [43] PVWatts. Draw Your System. [en línea]. Disponible en: <<https://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php>>
- [44] GeoHack. GeoHack-Refugio de Lizara. [en línea]. Disponible en: <https://tools.wmflabs.org/geohack/geohack.php?language=es&pagename=Refugio_de_Lizara¶ms=42.76398_N_-0.63461_E_type:landmark&_sm_au_=iVVQBqV0MQ27BpZrkpQ8jKtB7ckcW>
- [45] Celestis. What are the "azimuth and elevation" of a satellite? [en línea]. Disponible en: <<https://www.celestis.com/resources/faq/what-are-the-azimuth-and-elevation-of-a-satellite/>>
- [46] I-ambiente. Construir una casa con la orientación óptima para un uso eficiente de la energía. [en línea] Disponible en: <<http://www.i-ambiente.es/?q=noticias/construir-una-casa-con-la-orientacion-optima-para-un-uso-eficiente-de-la-energia>>
- [47] PVWatts.Results, Solar Radiation. [en línea]. Disponible en: <<https://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php>>
- [48] Solar Panel Tilt. Optimum Tilt of Solar Panels. [en línea]. Disponible en: <<https://www.solarpaneltilt.com/>>
- [49] SinoVoltaic. Solar Panel Angle: how to calculate solar panel tilt angle? [en línea]. Disponible en: <<https://sinovoltaics.com/learning-center/system-design/solar-panel-angle-tilt-calculation/>>
- [50] SUNPOWER. Maxeon 3, Residential Solar Panel. [en línea]. Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/wp-content/uploads/2019/05/Ficha-Tecnica-Panel-SunPower_MAX3-400-390-370.pdf>
- [51] PVWatts.Loss Calculator. [en línea]. Disponible en: <<https://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php>>
- [52] HelioEsfera. Instalacion fotovoltaica aislada. [en línea]. Disponible en: <<https://www.helioesfera.com/instalacion-fotovoltaica-aislada/>>

- [53] iContainers. Guía de los distintos tipos de contenedores marítimos y sus dimensiones. [en línea]. Disponible en: <<https://www.icontainers.com/es/tipos-de-contenedores-y-sus-dimensiones/>>
- [54] L. Joerissen, J. Garche, Ch. Fabjan, G. Tomazic. Possible use of vanadium redox-flow batteries for energy storage in small grids and stand-alone photovoltaic systems. 2004
- [55] Enernews. *Generación Distribuida: Los pasos para vender energía* [en línea]. Disponible en: <<http://enernews.com/319748/generacion-distribuidalos-pasos-para-vender-energia>>
- [56] Mexico news daily. *¿Quién necesita baterías? El almacenamiento bombeado 'batería de lago' planeado para Baja California.* [en línea]. Disponible en: <<https://mexiconewsdaily.com/mexicolife/pumped-storage-lake-battery-planned/>>
- [57] El periódico de la energía. *El volante de inercia quiere liderar el mercado de almacenamiento de energía renovable.* [en línea]. Disponible en: <<https://elperiodicodelaenergia.com/el-volante-de-inercia-quiere-liderar-el-mercado-de-almacenamiento-de-energia-renovable/>>
- [58] MIT Technology Review. *Una nueva batería española podría conseguir el despliegue masivo de las energías renovables.* [en línea]. Disponible en: <<https://www.technologyreview.es/s/9574/una-nueva-bateria-espanola-podria-conseguir-el-despliegue-masivo-de-las-energias-renovables>>